

**Cucu Wahyudin dan Agung Apriliandi**

Penerapan Metode *Six Sigma* pada IKM Manufaktur Industri Pendukung (*Supporting Industry*) untuk Meminimalkan Jumlah Produk Cacat

**Griffani Megiyanto Rahmatullah, Andry Haidar, Idhamartya Wulani, Aldiyans Nurcahyo, dan Ajeng Denita Khoerunnisa**

Sistem Aplikasi Terintegrasi Pelaporan Keadaan Darurat di Jalan tol Berbasis NodeMCU

**Kusnandar, Ni Ketut Hariyawati Dharmi, dan Aisyah Nurul Khairiyah**

Rancang Bangun Purwarupa *Energy Harvesting* menggunakan Piezoelektrik sebagai Pembangkit Energi Listrik

**Mutaufiq, Hendri Sulisty, Kamin Sumardi, Ega Taqwali Berman, dan Apri Wiyono**

*Performance Investigation of Cooling Machine Practice Props After Retrofitted by Natural Refrigerants*

**Putu Teta Prihartini Aryanti, Tania Finarianingrum, Annisa Rakhmawati Darlis, Fahmi Widjaya, dan Adhani Nur Fajrina**

Unit Ultrafiltrasi-Karbon Aktif-Resin Penukar Ion Terintegrasi untuk Pengolahan Air Sumur Menjadi Air Minum

**Ermayana Megawati, Jihan Pradesi, Dewi Zainul Khabibah, dan Firman Ardiansyah Ekoanindiyo**

Pendekatan Metode ABC Pada Toko X untuk Pengendalian Persediaan Barang

**Adi Ganda Putra, Azwar Manaf, dan Djoko HP**

Pengaruh Elemen Paduan and Senyawa terhadap Karakteristik Paduan Magnesium dan Aplikasinya - Kajian

**Rifa Hanifatunnisa dan Rahmawati Hasanah**

Aplikasi Filter Digital untuk Citra Mengandung Derau *Salt and Pepper* Menggunakan Metode *Directional Weighted Minimum Deviation*

## TIM REDAKSI

- Pimpinan Redaksi : Dr. Yudi Herdiansah, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Sinta ID: 6717762)
- Dewan Redaksi : • Dr. Ir. Ferry Rusgiarto, M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID: 56688583600)
- Dr. Hendriyana, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID: 57189732631)
  - Yuda Bakti Zainal, ST., MT  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Sinta ID: 6083767)
  - Agus Juhara, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani)
  - Dr. Ir. Djoko Hadi Prajitno, MSME.  
(Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) - Bandung,  
Scopus ID: 6507211795)
- Editor Teknis : • Deny Bayu Saefudin, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Sinta ID: 133135)
- Atik Charisma, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID: 57188567470)
  - Giri Angga Setia, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID: 57194215122)
  - Antrisha Daneraici Setiawan, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 57188573899)
  - Xbal Meiprastyo, S.T., M.Eng.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 6722189)
  - Andri Rahmat Kumalasian, S.T., M.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
  - Tiara Ariani Putri, S.T.  
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
-

**Penerbit :**

**Fakultas Teknik**

**Universitas Jenderal Achmad Yani (Kampus Bandung)**

Jl. Terusan Gatot Subroto Tromol Pos 807

Bandung – Jawa Barat

Indonesia

40285

Telp. : 022-731-2741

**Fakultas Teknik**

**Universitas Jenderal Achmad Yani (Kampus Cimahi)**

Jl. Terusan Jenderal Sudirman P.O. Box 148

Cimahi – Jawa Barat

Indonesia

40531

Telp. : 022-665-4572

022-664-3006

**Jurnal Teknik** merupakan **jurnal *peer-reviewed*** dalam **Bahasa Indonesia** di bidang keteknikan yang terbit **2 kali dalam setahun**. Terbit di bulan **Mei** dan **November** sejak tahun 2001. Jurnal Teknik versi online baru terbit pada tahun 2017 dengan fasilitas pengumpulan dan penerbitan online yang berbasis **Open Access Journal** dan mengikuti [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Harga Berlangganan	: Institusi	Rp. 170.000,-/tahun
	Individu	Rp. 160.000,-/tahun
Harga Tidak Berlangganan	: Rp. 100.000,-/nomor	

## MITRA BESTARI

Anggota Tim Mitra Bestari Jurnal Teknik Tahun 2020

- Prof. Dr. Bambang Sutjiatmo, Dipl. Ing. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 6506054959)
- Prof. I. N. Suprpta Winaya, S.T., M.A.Sc., Ph.D. (Universitas Udayana, Indonesia, Scopus ID: 18635759300)
- Prof. Dr. Ir. Lilik Sudiajeng, M.Erg. (Politeknik Negeri Bali, Scopus ID: 55189864100)
- Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, M.T., IPM. (Universitas Trisakti, Scopus ID: 15128239500)
- Dr. Suhartono, S.T., M.Si. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 57189075734)
- Dr. Damawidjaya Biksono, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 5984218)\*
- Dr. Asep Najmurokhman, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 55919091000)\*
- Yusuf Dewantoro Herlambang, S.T., M.T., Ph.D. (Politeknik Negeri Semarang, Indonesia, Scopus ID: 57194209980)
- Ir. Nur Indrianti, M.T., D.Eng. (UPN Veteran Yogyakarta, Indonesia, Scopus ID: 15071306300)
- Dr. P. Y. M. Wibowo Nd, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 55983351800)
- Dr. Sutarno, Ir., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 57205031839)
- Dr. Nita Puspita Hidayat, Ir., M.T. (Universitas Islam Bandung, Indonesia, Scopus ID: 57201677362)\*
- Dr. Rinto Yusriski, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 56582391600)
- Dr. Eng. Christina Wahyu K., S.T., M.T. (Universitas Brawijaya, Indonesia, Scopus ID: 56688583600)
- Dr. Nadiem Anwar, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
- Dr. Ir. Iskandar Muda, M.Eng. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 57195229456)
- Dr. Tantular Nurtono, S.T., M.T. (Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia, Scopus ID: 15838524700)
- Dr. Ir. Djoko Hadi Prajitno, MSME. (Badan Tenaga Nuklir Nasional, Indonesia, Scopus ID: 6507211795)

- Putu Doddy Sutrisna S.T., M.Sc., Ph.D. (Universitas Surabaya, Indonesia, Scopus ID: 6504553709)
- Dr.Eng. Achmad Munir, S.T., M.Eng. (Institut Teknologi Bandung, Scopus ID: 25638780900)
- Ir. Kusharjanto, M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 57193392775)
- Sofyan Basuki, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
- Ir. Emi Prasetyawati Umar, S.Si., M.T., IPP (Universitas Muslim Indonesia, Indonesia, Scopus ID: 57201065526)
- Dr. Ir. Ariani Budi Safarina, M.T., (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 57200635517)
- Ir. Nana Heryana, IPM (Institut Teknologi Bandung, Indonesia, Scopus ID: 35174665300)\*
- Dr. Eng. Heriansyah Putra, S.Pd., M.Eng. (Institut Pertanian Bogor, Indonesia, Scopus ID: 57195301854)
- Dr. Charles Sitompul, ST., MT., MIM (Universitas Khatolik Parahyangan, Indonesia, Scopus ID: 23975188900)
- Ir. Harry Ramza, M.T., Ph.D (Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka, Indonesia, Scopus ID: 55189898100)
- Dr. Ir. Endang Prasetyaningsih, M.T. (Universitas Islam Bandung, Indonesia, Scopus ID: 57189580587)
- Annisa Uswatun Khasanah, S.T., MBA., M.Sc (Universitas Islam Indonesia, Indonesia, Scopus ID: 57195477115)\*
- Syah Alam, S.Pd., M.T. (Universitas Trisakti, Indonesia, Scopus ID: 57191903622)
- Dr. Imroatul Chalimah Juliana, S.T., M.T. (Universitas Sriwijaya, Indonesia, Scopus ID: 57193694034)
- Dr. Khoiruddin, S.T., M.T. (Institut Teknologi Bandung, Indonesia, Scopus ID: 55584284500)\*
- Salita Ulitia Prini, S.Kom, M.T. (Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Indonesia, Scopus ID: 57208581701)\*
- Edwar, S.T., M.T. (Universitas Telkom, Indoneisa, Scopus ID: 57188569370)
- Dr. Putu Teta Prihartini, S.T., M.T.(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 56951380600)
- Dr. Joko Waluyo, S.T., M.T. (Universitas Sebelas Maret, Indonesia, Scopus ID: 37114996900)\*
- Dr. Hendy Suryana, S.T., M.T., IPM.(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 57200332569)
- Dr. Ir. Oviyan Patra, M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 6756651)

- Dr. Sabhan Kanata, ST.,M.Eng. (Institut Teknologi Sumatera, Indonesia, Scopus ID: 57205531562)\*
- Dr. Carles Sitompul, S.T., M.T., M.I.M. (Universitas Katholik Parahyangan, Indonesia, Scopus ID: 23975188900)\*
- Handoko Rusiana Iskandar, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 57194219446)\*
- Aji Putro Prakoso, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 57200571585)\*
- Martijani, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 6082246)\*

## DAFTAR ISI

<b>Penerapan Metode <i>Six Sigma</i> pada IKM Manufaktur Industri Pendukung (<i>Supporting Industry</i>) untuk Meminimalkan Jumlah Produk Cacat</b> Cucu Wahyudin dan Agung Apriliandi	104-113
<b>Sistem Aplikasi Terintegrasi Pelaporan Keadaan Darurat di Jalan tol Berbasis NodeMCU</b> Griffani Megiyanto Rahmatullah, Andry Haidar, Idhamartya Wulani, Aldiyans Nurcahyo, dan Ajeng Denita Khoerunnisa	114-124
<b>Rancang Bangun Purwarupa <i>Energy Harvesting</i> menggunakan Piezoelektrik sebagai Pembangkit Energi Listrik</b> Kusnandar, Ni Ketut Hariyawati Dharmi, dan Aisyah Nurul Khairiyah	125-135
<b><i>Performance Investigation of Cooling Machine Practice Props After Retrofitted by Natural Refrigerants</i></b> Mutaufiq, Hendri Sulisty, Kamin Sumardi, Ega Taqwali Berman, dan Apri Wiyono	136-145
<b>Unit Ultrafiltrasi-Karbon Aktif-Resin Penukar Ion Terintegrasi untuk Pengolahan Air Sumur Menjadi Air Minum</b> Putu Teta Prihartini Aryanti, Tania Finarianingrum, Annisa Rakhmawati Darlis, Fahmi Widjaya, dan Adhani Nur Fajrina	146-155
<b>Pendekatan Metode ABC Pada Toko X untuk Pengendalian Persediaan Barang</b> Ermayana Megawati, Jihan Pradesi, Dewi Zainul Khabibah, dan Firman Ardiansyah Ekoanindiyo	156-165
<b>Pengaruh Elemen Paduan and Senyawa terhadap Karakteristik Paduan Magnesium dan Aplikasinya – Kajian</b> Adi Ganda Putra, Azwar Manaf, dan Djoko HP	166-179
<b>Aplikasi Filter Digital untuk Citra Mengandung Derau <i>Salt and Pepper</i> Menggunakan Metode <i>Directional Weighted Minimum Deviation</i></b> Rifa Hanifatunnisa dan Rahmawati Hasanah	180-189

## DARI REDAKSI

Puji syukur kami panjatkan kehadapan Tuhan Yang Maha Kuasa atas perkenan-Nya kami dapat menerbitkan Jurnal Teknik (JT) Volume 20 Nomor 2, bulan November 2021. Dalam edisi ini disajikan 8 (delapan) makalah berkaitan dengan bidang Ilmu Teknik, yang mencakup Teknik Kimia, Teknik Elektro, Teknik Mesin, Teknik Sipil, Teknik Metalurgi, dan Teknik Industri lingkungan yang meliputi: (1) Penerapan Metode *Six Sigma* pada IKM Manufaktur Industri Pendukung (*Supporting Industry*) untuk Meminimalkan Jumlah Produk Cacat, (2) Sistem Aplikasi Terintegrasi Pelaporan Keadaan Darurat di Jalan tol Berbasis NodeMCU, (3) Rancang Bangun Purwarupa I menggunakan Piezoelektrik sebagai Pembangkit Energi Listrik, (4) *Performance Investigation of Cooling Machine Practice Props After Retrofitted by Natural Refrigerants*, (5) Unit Ultrafiltrasi-Karbon Aktif-Resin Penukar Ion Terintegrasi untuk Pengolahan Air Sumur Menjadi Air Minum, (6) Pendekatan Metode ABC Pada Toko X untuk Pen-gendalian Persediaan Barang, (7) Pengaruh Elemen Paduan and Senyawa terhadap Karakteristik Paduan Magnesium dan Aplikasinya – Kajian, (8) Aplikasi Filter Digital untuk Citra Mengandung Derau *Salt and Pepper* Menggunakan Metode *Directional Weighted Minimum Deviation*.

Redaksi menyampaikan rasa terima kasih kepada peneliti-peneliti untuk mempublikasikan hasil penelitiannya dalam Jurnal Teknik edisi 20 (2) ini. Tak lupa juga kami ucapkan terima kasih kepada Mitra Bestari yang telah membantu hingga Jurnal Teknik ini dapat diterbitkan. Redaksi senantiasa mengundang peneliti, perekayasa, dan para fungsional lain untuk memberikan kontribusi bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya bidang ilmu teknik. Kritik dan saran atas ketidak-sempurnaan dalam Jurnal Teknik sangat kami harapkan demi kemajuan dan penyempurnaan dalam terbitan selanjutnya. Semoga pemuatan karya dalam terbitan kali ini dapat menjadi pemicu peneliti-peneliti untuk melahirkan karya-karya lain dengan ide-ide original dan bermanfaat untuk masyarakat.

Cimahi, 30 November 2021

Dewan redaksi



## Penerapan Metode *Six Sigma* pada IKM Manufaktur Industri Pendukung (*Supporting Industry*) untuk Meminimalkan Jumlah Produk Cacat

Cucu Wahyudin<sup>1</sup>, dan Agung Apriliandi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknologi Manufaktur, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

<sup>1</sup>[cucuwahyudin100@gmail.com](mailto:cucuwahyudin100@gmail.com), <sup>2</sup>[agungapriliandi96@gmail.com](mailto:agungapriliandi96@gmail.com)

### Abstrak

Industri pendukung merupakan industri yang membuat barang dan jasa, menjual ke pasar bebas atau ke industri lain untuk mendukung produk akhir yang memiliki nilai tambah. Karakteristik industri pendukung adalah *business to business*, sehingga efisiensi proses produksi menjadi kunci daya saingnya. Proses produksi yang efisien dapat meminimalkan cacat sehingga biaya produksi dapat diperkecil. Penelitian ini mengkaji penerapan metode *six sigma* di industri pendukung yang memproduksi alat peraga pendidikan. Penelitian dilakukan di perusahaan dengan tingkat kecacatan hingga 8,10 % pada produk cermin kombinasi. Nilai sigma produk tersebut sebesar 3,71 yang menunjukkan bahwa peluang untuk melakukan perbaikan proses masih sangat terbuka. Perbaikan proses dilakukan dengan menerapkan tahapan perbaikan DMAIC (*Define–Measure–Analyze–Improve–Control*). Pada tahap *define* diketahui yang menjadi cacat dominan adalah jenis cacat *Shrink Mark*, yaitu sebesar 31% dari keseluruhan jenis kecacatan produk. Penyebab terjadinya cacat tersebut adalah tidak adanya nilai *setting parameter* yang digunakan secara konsisten pada mesin *injection molding*. Melalui serangkaian eksperimen, penelitian ini menentukan nilai *setting parameter* yang dapat meminimalkan cacat jenis *shrink mark*. Faktor *setting parameter* terpilih adalah *cooling time* dan *holding pressure* dengan nilai masing masing selama 20 detik dan 105 MPa. *Reject rate* produk cermin kombinasi berhasil diminimalkan dan nilai sigma meningkat menjadi 4,13.

Kata kunci: *Cooling Time*, DMAIC, *Holding Pressure*, industri pendukung, *Six Sigma*

### Abstract

Supporting industry is industries that make goods and services, sell to the free market, or to other industries to support their final products with greater value. With characteristics being business to business, the efficiency of the production process is the key. An efficient production process can minimize defects so that production costs can be minimized. This research is an application of the six sigma method in supporting industries that produce educational aids. Was conducted in a company with a defect rate of up to 8,10%, named combination mirror products with a sigma value is 3,71. Process improvement by implementing the DMAIC (*Define-Measure-Analyze-Improve-Control*). At the define stage, the dominant defect is the Shrink Mark defect, which is 31% of all types of product defects. The cause of defect is the absence of parameter setting values that are used consistently on the injection molding machine. Through experiments, this research determines the parameter setting values that can minimize shrink mark type defects. The selected parameter setting factors are Cooling Time and Holding Pressure with a value of 20 seconds and Holding Pressure of 105 MPa. The reject rate of the combination mirror product was successfully minimized and the sigma value increased to 4.13.

Keywords: *Cooling Time*, DMAIC, *Holding Pressure*, supporting industry, *Six Sigma*

### 1. Pendahuluan

Industri pendukung (*supporting industry*) adalah satu dari sepuluh program industri prioritas. Salah satu upaya pemerintah untuk memperkuat struktur industri diantaranya dengan melakukan pengembangan IKM pendukung (*supporting industry*) kluster industri. Industri pendukung kluster industri didefinisikan sebagai industri yang membuat barang dan jasa bukan untuk memenuhi kebutuhan sendiri, tetapi dijual ke pasar bebas atau ke industri lain untuk mendukung produk akhir yang memiliki nilai tambah yang tinggi (Departemen Perindustrian dan Perdagangan RI, 2003). Ciri/kriteria IKM industri pendukung adalah : (1) hasil produksinya dipasok ke pasar bebas/ke industri lain, (2) terjadi peningkatan nilai tambah, (3) bersifat substitusi impor, dan (4) pada umumnya berfungsi sebagai subkontraktor. Sebagai subkontraktor, efisiensi proses produksi menjadi cara untuk meminimalkan biaya produksi.

*Six sigma* adalah metoda yang sudah mapan dalam mengidentifikasi dan menghilangkan cacat, kesalahan atau kegagalan dalam proses atau sistem bisnis dengan berfokus pada karakteristik kinerja proses yang sangat penting bagi pelanggan (Snee, 2004). Meskipun *six sigma* telah diterapkan dengan sukses di banyak perusahaan besar, masih ada bukti yang kurang terdokumentasi tentang penerapannya di organisasi yang lebih kecil (Jiju et.al, 2005). Penelitian tentang penerapan *six sigma* di perusahaan kecil menengah diantaranya dilakukan oleh Kandil dan Aziz (2017), Scheller et al, (2017), dan Swarnakar, Tiwari dan Singh, (2020).

#### Info Makalah:

Dikirim : 08-04-20;  
Revisi 1 : 04-08-21;  
Revisi 2 : 05-21-21;  
Revisi 3 : 06-29-21;  
Diterima : 07-16-21.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +62 878-2149-5772  
e-mail : [cucuwahyudin100@gmail.com](mailto:cucuwahyudin100@gmail.com)

Penelitian Kandil dan Aziz (2017) berfokus pada masalah yang terkait dengan rantai pasokan pada usaha kecil menengah di Mesir. Metoda *six sigma* dipakai untuk menjelajahi area yang perlu diperbaiki dan menilai dampak teknologi dalam meningkatkan kinerja perusahaan. Scheller et.al (2017) menunjukkan bahwa *Lean* dan *Six Sigma* diterapkan secara terpisah dalam dua program yang berbeda. Beberapa aspek yang diperlukan untuk meningkatkan integrasi kedua pendekatan telah diidentifikasi sambil mempertimbangkan setiap fase DMAIC dan pendekatan aktual yang diterapkan oleh perusahaan. Meskipun beberapa hasil positif telah dicapai, ada banyak faktor kritis dan kegagalan yang dapat mempengaruhi implementasi kedua pendekatan tersebut, seperti pelatihan karyawan dan perubahan lingkungan organisasi. Swarnakar, Tiwari, dan Singh (2020) melakukan penelitian dengan tujuan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi dan mengembangkan model terstruktur yang mengukur keterkaitan antara faktor kegagalan kritis yang mempengaruhi implementasi *Lean Six sigma* yang berkelanjutan dalam organisasi manufaktur.

Penelitian ini akan mengkaji penerapan metoda *six sigma* di IKM industri pendukung yang memproduksi alat peraga pendidikan. Perusahaan menghadapi permasalahan cacat yang cukup tinggi pada beberapa produknya. Berdasarkan data produksi divisi plastik dari Bulan September 2018–Februari 2019, produk cermin kombinasi adalah produk plastik dengan tingkat kecacatan tertinggi. Tercatat produk cacat cermin kombinasi berjumlah 526 unit dari total 6.496 unit produk yang diproduksi, atau sebesar 8,10%. Adanya sejumlah unit cacat tersebut mengakibatkan kerugian sebesar Rp 8.942.000,- karena produk cacat tidak bisa digunakan untuk proses berikutnya maupun diproses ulang (*rework*). Proses *rework* untuk produk cacat tidak dapat dilakukan karena berpengaruh pada fungsi produk ketika digunakan.

Cacat jenis *shrink mark* merupakan cacat produk dengan persentase terbesar. Cacat *shrink mark* terjadi karena belum adanya standar operasi pengaturan *setting parameter* pada mesin *Injection Molding*, sehingga *setting parameter* yang digunakan oleh operator untuk produksi tidak konsisten (Dakshinamoorthi et.all, 2014). Faktor *setting parameter* dibutuhkan karena berkontribusi pada kualitas produk barang yang dihasilkan. Oleh karenanya perusahaan membutuhkan standar operasi pengaturan *setting parameter* yang dapat meminimalkan cacat *shrink mark*. Penentuan *setting parameter* ditentukan dengan melakukan perancangan eksperimen untuk meminimalkan produk cacat cermin kombinasi dengan kecacatan dominan jenis *shrink mark*.

## 2. Metode

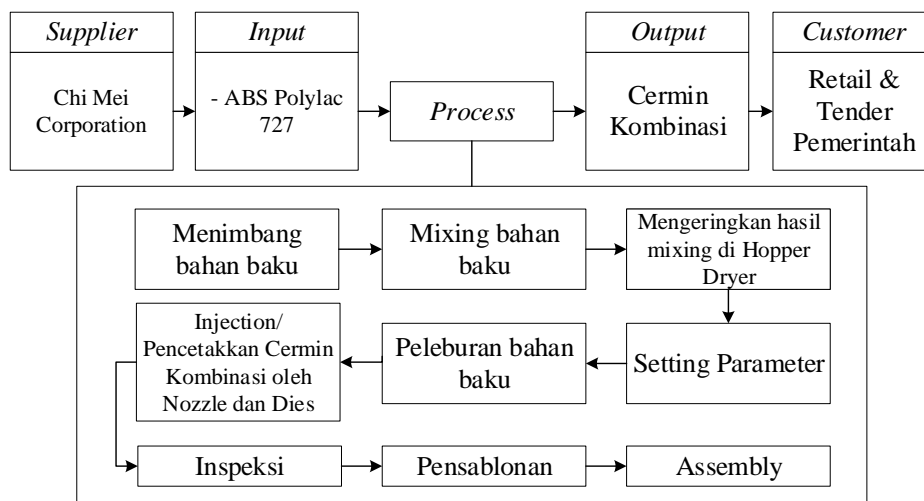
Penelitian dilakukan di industri manufaktur yang memproduksi alat peraga pendidikan dengan menggunakan pendekatan *Six Sigma*, Pyzdek dan Keller (2010), yang meliputi tahap *define, measure, analyse, improve, dan control*. Pada tahap *define* dilakukan pengamatan proses produksi, analisis data produksi dan identifikasi jenis – jenis cacat yang mungkin terjadi pada produk cermin kombinasi. Tahap *measure* melakukan pengukuran jumlah produk cacat serta capaian nilai sigma pada kondisi saat dilakukan penelitian. Tahap *analyze* mengidentifikasi akar penyebab masalah dengan menggunakan alat diagram pareto, *fishbone diagram* dan *failure mode effect analysis*. Pada tahap *improve* dilakukan perbaikan proses dengan menentukan *setting parameter* mesin *injection molding* melalui percobaan. Rancangan eksperimen faktorial dilakukan untuk menentukan *setting parameter* mesin injeksi *molding* yang dapat meminimalkan produk cacat. Tahap *control* dilakukan untuk menjaga konsistensi penggunaan nilai *setting parameter* yang diperoleh dari hasil eksperimen, yaitu dengan membuat *Standard Operating Procedure* penggunaan mesin *injection molding*.

## 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengamatan dan pengolahan data dengan menggunakan pendekatan *Six Sigma* untuk setiap tahapannya (DMAIC) disajikan sebagai berikut:

### a. Define

Pada tahap *define* dilakukan observasi terhadap input material, proses produksi, dan keluaran produk yang dihasilkan yaitu produk cermin kombinasi. Observasi terhadap input material dilakukan dengan melakukan pengamatan sejak pemeriksaan material yang datang dari *supplier* oleh bagian QC, yaitu material ABS *polylac 727*. Observasi terhadap kegiatan proses produksi dilakukan pada setiap tahapan proses seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, dan observasi pada keluaran dilakukan dengan melakukan pengukuran terhadap produk cermin kombinasi dan pengujian fungsinya.



Gambar 1. Diagram *Supplier-Input-Process-Output-Control*

Berdasarkan data observasi pada bulan September 2018 hingga bulan Februari 2019, kerugian yang ditanggung oleh perusahaan sebesar Rp 8.492.000,-. Kecacatan produk diduga disebabkan oleh nilai *setting parameter* mesin *injection molding* yang belum terstandar.

b. *Measure* (Pengukuran nilai DPMO dan level sigma pada kondisi awal)

Perhitungan nilai DPMO dan level sigma pada kondisi pengamatan (*existing*) dilakukan melalui delapan tahapan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa level sigma pada kondisi *existing* adalah 3,71 yang menunjukkan terbukanya kesempatan untuk melakukan proses perbaikan, sehingga jumlah produk cacat dapat diminimalkan. Uraian perhitungan nilai sigma dijelaskan sebagai berikut:

- (1). *Unit* (U) = 6.496 unit.
- (2). *Opportunities* (OP) = 6
- (3). *Defect* (D) = 526 unit
- (4). *Defect per Unit* (DPU) = *Defect / Unit*  
= 526 / 6.496 = 0,0809
- (5). *Total Opportunities* (TOP) = *Unit × Oppurtinities*  
= 6.496 × 6 = 38.976
- (6). *Defect per Opportunities* (DPO) = *Defect / TOP*  
= 526 / 38.976 = 0,0134
- (7). *Defect per Million Opportunities* (DPMO) = *DPO × 1.000.000*  
= 0,0134 × 1.000.000  
= 13.495,48
- (8). *Level sigma*  
DPMO sebesar 13.495,48 berada diantara 13.553 dengan 13.209, maka level sigma adalah  
$$\frac{13.209 - 13.495,48}{13.209 - 13.553} = \frac{3,72 - x}{3,72 - 3,71}, x = 3,71$$

c. *Analyze*

Data pengamatan dikelompokkan berdasarkan jenis cacat dan jumlah cacatnya, sehingga diperoleh data seperti yang disajikan pada Tabel 1. Data data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa cacat *shrink mark* memiliki persentase jumlah cacat terbesar bila dibandingkan dengan cacat jenis lain, yaitu sebesar 31%. Oleh karenanya, minimalkan jumlah cacat pada jenis *shrink mark* akan dapat meminimalkan jumlah cacat produk secara keseluruhan. Penelitian ini berfokus pada perbaikan proses yang dapat meminimalkan jumlah cacat *shrink mark*.

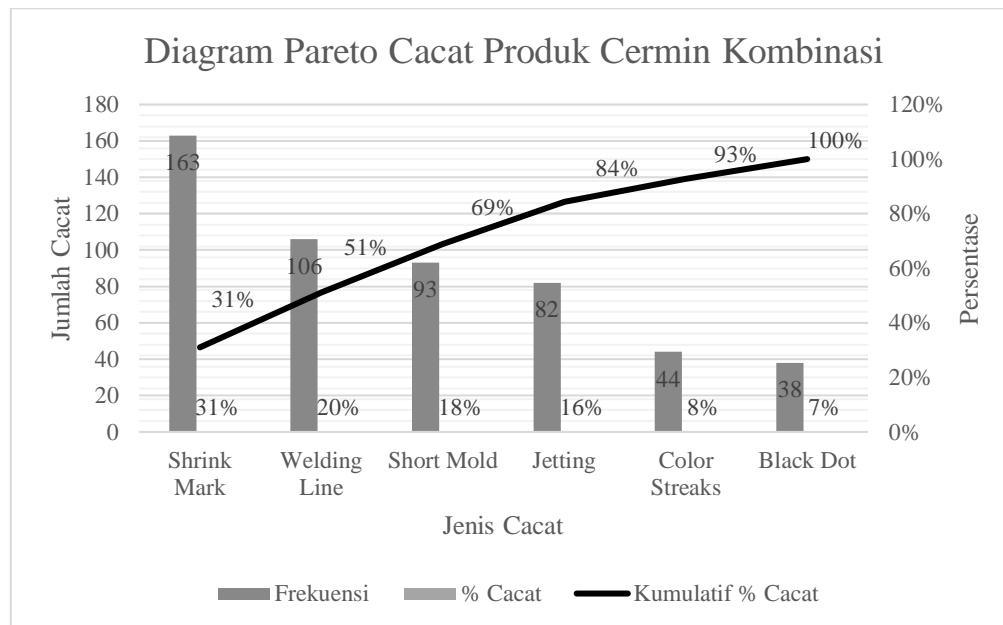
Tabel 1. Frekuensi Jenis – Jenis Cacat

No	Jenis cacat	Jumlah cacat (frekuensi)	Kumulatif jumlah cacat	% Cacat	Kumulatif % cacat
1	<i>Shrink mark</i>	163	163	31%	31%
2	<i>Welding line</i>	106	269	20%	51%
3	<i>Short mold</i>	93	362	18%	69%
4	<i>Jetting</i>	82	444	16%	84%
5	<i>Color streaks</i>	44	488	8%	93%
6	<i>Black dot</i>	38	526	7%	100%

Pada fase Analisis, diagram pareto digunakan bersama dengan *Cause Effect Diagram* dan *Failure Mode Effect Analysis* untuk menganalisis penyebab permasalahan yang dihasilkan dari hasil produksi produk cermin kombinasi sebelumnya.

#### 1. Diagram Pareto

Diagram pareto adalah salah satu alat analisis berbentuk grafik batang vertikal yang menunjukkan beberapa hal dalam urutan yang diprioritaskan, sehingga diagram pareto bertujuan untuk menentukan masalah yang harus ditangani terlebih dahulu. Kategori diurutkan dalam urutan menurun dari kiri ke kanan dalam diagram pareto berdasarkan jumlah atau biayanya.

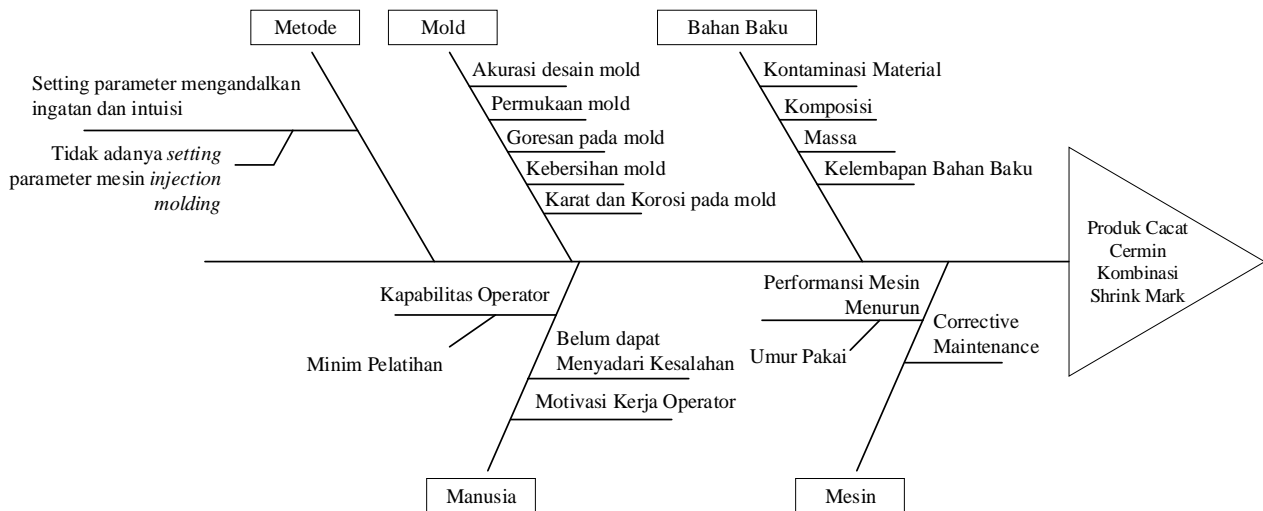


Gambar 2. Diagram Pareto Cacat Produk Cermin Kombinasi

Berdasarkan Gambar 2, dari enam jenis cacat yang teridentifikasi terdapat empat jenis cacat dengan persentase kumulatif sebesar 69% dari seluruh jenis cacat. Keempat jenis cacat tersebut yaitu *Shrink Mark*, *Welding Line*, *Short Mold* dan *Jetting*. *Shrink Mark* menjadi jenis cacat tertinggi dengan persentase cacat sebesar 31% yang menyebabkan hampir 70% produk cacat pada produk cermin kombinasi disebabkan oleh jenis cacat *shrink mark*. Besarnya persentase cacat jenis *shrink mark* mengindikasikan bahwa hal tersebut merupakan masalah yang perlu ditangani oleh pihak perusahaan dalam usaha meminimalkan *reject rate* yang cukup tinggi.

#### 2. Fishbone

Cacat *shrink mark* diprioritaskan untuk diminimalkan dan dianalisis penyebab kecacatannya dengan menggunakan diagram *fishbone* seperti disajikan pada Gambar 3. Analisis dengan diagram *fishbone* didasarkan pada prinsip 5 M, yaitu material, mesin, metode, manusia, dan modal. Hasil analisis menunjukkan bahwa *shrink mark* sangat dipengaruhi oleh metode kerja, terutama menyangkut ukuran parameter mesin injeksi *molding* yang belum standar. Penelitian ini melakukan percobaan dengan menggunakan berbagai ukuran parameter proses, sehingga dapat diketahui nilai parameter yang memberikan cacat terkecil yang dapat dijadikan sebagai standar proses.



Gambar 3. Analisis Penyebab Cacat dengan *Fishbone Diagram*

3. *FMEA (Failure Mode Effect Analysis)*

Untuk memvalidasi perbaikan yang akan ditempuh, maka dilakukan analisis lanjutan berupa *FMEA (Failure Mode Effect Analysis)*. Berdasarkan hasil *FMEA* didapatkan dua nilai *RPN* tertinggi, yaitu *cooling time* dan *holding pressure* seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Pada kedua faktor ini akan dilakukan proses perbaikan melalui eksperimen.

Tabel 2. Perhitungan Nilai *RPN* tertinggi

Jenis Kegagalan	Langkah Proses	Proses Standar	Mode Kegagalan Potensial	Penyebab Potensi Kegagalan	S	O	D	RPN	Tindakan Rekomendasi	Rank
	Set-Up Mold	Mold set up dan start up	Salah memasang mold	Kodefikasi data mold	6	4	3	72	Revisi kodefikasi pendataan mold	14
	Setting Parameter	Sesuai dengan standar setting parameter setiap produk	Setting parameter belum sesuai	Tekanan injeksi	7	7	5	245	Menentukan setting parameter injeksi optimal	5
				Tekanan tahan	8	8	6	384	Menentukan setting parameter tekanan tahan optimal	2
				Waktu tahan	6	7	5	210	Menentukan setting parameter waktu tahan optimal	6
				Waktu pendinginan	8	8	6	384	Menentukan setting parameter waktu pendinginan optimal	2
				Suhu Mold	6	6	5	180	Menentukan setting parameter suhu leleh optimal	7
				Suhu leleh	7	8	6	336	Menentukan setting parameter suhu leleh optimal	3
				Kecepatan injeksi	8	7	5	280	Menentukan setting parameter kecepatan injeksi optimal	4
	Pemotongan Geram	Tidak adanya sisa Case pada produk	Terdapat sisa Case pada produk	Belum terdapat standar pemotongan geram	7	6	4	168	Membuat display berupa gambar produk tanpa geram	8
				Tidak terdapat alat khusus pemotongan Case	7	6	4	168	Menyediakan alat potong khusus	9

d. *Improve*

Pada tahap *improve* dilakukan perancangan eksperimen dengan tujuan untuk mengetahui faktor yang berpengaruh terhadap cacat *shrink mark*, yaitu berdasarkan nilai *RPN* tertinggi. Berikut langkah yang ditempuh dalam perancangan eksperimen.

1. Identifikasi Variabel Penelitian

Identifikasi variabel dilaksanakan agar penelitian dapat dilakukan secara terarah, yaitu dengan menentukan variabel terikat dan variabel bebas yang dapat mempengaruhi tujuan untuk meminimasi cacat *shrink mark*. Daftar variabel yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Variabel Penelitian

No	Nama variabel	Jenis variabel
1	Cacat shrink mark	Variabel terikat
2	Cooling time	Variabel bebas
3	Holding pressure	Variabel bebas

Cacat *shrink mark* menjadi variabel terikat karena dipengaruhi oleh faktor – faktor nilai *setting parameter* (Dakshinamoorthi et.al, 2014). Penentuan variabel bebas *cooling time* dan *holding pressure* dikarenakan cacat *shrink mark* terjadi pada proses *packing* dan *cooling*. Pada saat proses *packing*, *holding pressure* berfungsi untuk menahan agar material terinjeksi sempurna memenuhi area cetakan. Sementara *cooling time* berfungsi agar pada saat pendinginan seluruh bagian produk mendingin dan mengeras lebih merata untuk meminimalkan terdapatnya bagian yang belum mengeras.

2. Identifikasi Metode Eksperimen & Karakteristik Eksperimen

Berdasarkan banyaknya jumlah variabel bebas yang telah ditentukan, yakni sebanyak dua faktor, maka digunakan metode eksperimen faktorial  $3^2$  dengan dua faktor yang dipelajari dan tiga taraf perlakuan untuk masing–masing faktornya.

- Penentuan lamanya *cooling time*

Penentuan lamanya waktu pendinginan pada *setting parameter* mesin *injection molding* secara teoritis menggunakan persamaan Ballman dan Shusman (1959).

$$S = \frac{-T^2}{2 \times \pi \times \alpha} \ln \left[ \frac{\pi}{4} \times \frac{(T_r - T_m)}{(T_c - T_m)} \right] \tag{1}$$

- (1). T : 2.95 mm<sup>2</sup>
- (2). T<sub>m</sub> : 35°C
- (3). α : 0,1156 (mm<sup>2</sup>/s)
- (4). T<sub>c</sub> : 185°C
- (5). T<sub>r</sub> : 88°C

$$S = \frac{-2.95^2 \text{ mm}^2}{2 \times 3.14 \times 0.1156 \text{ mm}^2/\text{s}} \ln \left[ \frac{3.14}{4} \times \frac{(88^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C})}{(185^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C})} \right]$$

$$S = \frac{-8.7025 \text{ mm}^2}{0.7259 \text{ mm}^2/\text{s}} \ln \left[ \frac{3.14}{4} \times \frac{(65^\circ\text{C})}{(135^\circ\text{C})} \right]$$

$$S = -11.9885 \times -1.2824$$

$$S = 15.37 \text{ detik}$$

- Penentuan besarnya *holding pressure*

Besarnya tekanan tahanan yang digunakan untuk penelitian ini menyesuaikan dengan penggunaan tekanan injeksi, yakni sebesar 70 – 80% dari tekanan injeksi.

Berdasarkan perhitungan waktu minimal *cooling time* dan *holding pressure* maka ditentukan tiga taraf perlakuan seperti yang diperlihatkan pada Tabel 4. Dasar penentuan tiga taraf tersebut adalah untuk mengetahui perbandingan hasil antar kondisi percobaan apabila berada dibawah, tepat, dan diatas angka parameter minimal yang disarankan.

Tabel 4. Penentuan Taraf Setiap Faktor

Kode	Faktor	Taraf 1	Taraf 2	Taraf 3
A	<i>Cooling time</i>	10 detik	16 detik	20 detik
B	<i>Holding pressure</i>	90 MPa	100 MPa	105 MPa

3. Data Hasil Eksperimen  
- Data Hasil Eksperimen

Tabel 5. Data Jumlah Cacat Eksperimen dalam Unit

Cooling Time	Holding Pressure			Total Baris
	90 MPa	100 MPa	105 MPa	
10 detik	10	7	8	47.00
	8	7	7	
Jumlah	18.00	14.00	15.00	
16 detik	5	5	4	24.00
	4	3	3	
Jumlah	9.00	8.00	7.00	
20 detik	5	3	2	20.00
	4	4	2	
Jumlah	9.00	7.00	4.00	
Total Kolom	36.00	29.00	26.00	91.00

- Analisis Faktorial

Tabel 6. Analysis of Variance (ANOVA)

Sumber Variasi	SS	Df	MS	F hitung	F tabel	Kesimpulan
Faktor (A)	70.78	2	35.39	49.01	4.26	Berpengaruh
Faktor (B)	8.78	2	4.39	6.08	4.26	Berpengaruh
Interaksi A&B	2.89	4	0.7225	1.09	3.63	Tidak berpengaruh
Error	6.5	9				
Total	88.95					

Pada penelitian ini kedua faktor yang diuji yakni *cooling time* dan *holding pressure* dinyatakan berpengaruh terhadap terjadinya cacat produk cermin kombinasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5. Hal ini juga dapat dilihat pada Tabel 6 bahwa F hitung kedua faktor tersebut lebih besar apabila dibandingkan dengan F tabel. Sedangkan interaksi antara faktor *cooling time* dan *holding pressure* tidak berpengaruh terhadap terjadinya cacat pada produk cermin kombinasi.

- Uji Setelah ANOVA (*Uji Scheffee*)

*Uji scheffe* digunakan untuk membandingkan pasangan rata-rata perlakuan. *Uji Scheffe* dapat dilihat berdasarkan nilai signifikan yang dihasilkan menggunakan *software* SPSS. Jika nilai Sig. < 0,05, maka variabel bebas signifikan terhadap variabel tak bebas. Jika nilai Sig. > 0,05, maka variabel bebas tidak berpengaruh signifikan terhadap variabel terikat. Agar dapat dengan mudah dipahami, maka *setting parameter* optimal dapat dilihat dari nilai subset terkecil.

Tabel 7. *Homogeneous Subset*

Cooling time	Subset		Holding pressure	Subset	
	1	2		1	2
20 detik	3.333	-	105 MPa	4.333	-
16 detik	4.000	-	100 MPa	4.833	4.833
10 detik	-	7.833	90 MPa	-	6.000
Sig.	0.432	1.000	Sig.	0.612	0.112

Maka kondisi *setting parameter* optimal untuk *cooling time* adalah 20 detik dan *setting parameter* optimal untuk *holding pressure* adalah 105 MPa.

4. Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk mengetahui hasil dari nilai *setting parameter* terpilih. Hasil eksperimen konfirmasi dapat dilihat pada Tabel 7 yang menunjukkan bahwa jumlah produk cacat minimum terjadi pada percobaan 1, 2, dan 4. Oleh karenanya, parameter pada percobaan 1, 2, dan 4 berpeluang untuk dijadikan sebagai parameter standar.

Tabel 8. Hasil Eksperimen Konfirmasi

Eksperimen	Jumlah produk eksperimen	Produk oke	Produk cacat	% Cacat
1	100	98	2	2.04%
2	100	98	2	2.04%
3	100	96	4	4.17%
4	100	98	2	2.04%
5	100	97	3	3.09%

Perhitungan nilai DPMO dan level sigma setelah percobaan dilakukan dengan menggunakan delapan tahap perhitungan sebagai berikut:

- (1). *Unit* (U) = 500 unit.
- (2). *Opportunities* (OP) = 6
- (3). *Defect* (D) = 13 unit
- (4). *Defect per Unit* (DPU) =  $Defect / Unit = 13/500 = 0,026$
- (5). *Total Oppurtunities* (TOP) =  $Unit \times OP = 500 \times 6 = 3.000$
- (6). *Defect per Oppurtunities* (DPO) =  $D / TOP = 13 / 3.000 = 0,0043$
- (7). *Defect per Million Oppurtunities* (DPMO) =  $DPO \times 1.000.000 = 0,0043 \times 1.000.000 = 4.333,33$
- (8). *Level sigma*: DPMO sebesar 4.333,33 berada diantara 4.397 dengan 4.269  

$$= \frac{4.269 - 4.333,33}{4.269 - 4.397} = \frac{4,13 - x}{4,13 - 4,12}, x = 4,13$$

#### 5. Perbandingan Sebelum & Sesudah Eksperimen

Setelah proses perbaikan, rata-rata level sigma naik dari 3,71 menjadi 4,13. Hal ini menunjukkan bahwa parameter mesin *injection molding* yang diperoleh dari hasil eksperimen dapat menurunkan jumlah produk cacat.

Tabel 9. Perbandingan Sebelum dan Sesudah Improvement

Keterangan	Sebelum <i>improvement</i>	Setelah <i>improvement</i>
<b>DPMO</b>	13.495,48	4.333,33
<b>Rata – rata Level Sigma</b>	3,71	4,13

#### e. Control

Langkah terakhir yang dilakukan pada penelitian ini adalah membuat *Standard Operating Procedure* (SOP) *setting parameter* mesin *injection molding* untuk produk cermin kombinasi agar terdapat standar baku perusahaan. Usulan SOP yang dibuat dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 10. Standar Operasi Prosedur Produksi Cermin Kombinasi

Standar Operasi Prosedur Cermin Kombinasi			
Nomor Mold	321	Nomor Mesin	
Nomor Gambar	-	Komposisi Warna	-
Bahan	ABS	Suhu Pengeringan	82°C
Warna	Murni	Lama Pengeringan	2 jam
Cavity	2	Penggunaan Mold Release Setiap	5 shot
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Siapkan <i>mold</i> 0321.</li> <li>2. <i>Set up mold</i> 0321 pada mesin <i>Injection Molding</i>.</li> <li>3. Siapkan bahan baku ABS <i>Polylac 727</i>.</li> <li>4. Timbang sesuai dengan kapasitas <i>Hooper</i>.</li> <li>5. Apabila terdapat permintaan khusus produk berwarna maka campur bahan baku ABS <i>Polylac 727</i> dengan pewarna pada mesin <i>mixing</i> disesuaikan dengan komposisi warna yang akan digunakan (lihat berbagai warna pada <i>storage</i>).</li> <li>6. Masukkan bahan baku pada <i>Hooper</i>, atur suhu pengeringan pada 82°C dengan lama pengeringan selama 2 jam.</li> <li>7. Atur parameter Tekanan Injeksi pada 130 MPa.</li> <li>8. Atur parameter Tekanan Tahan pada 105 MPa.</li> <li>9. Atur parameter Waktu Tahan pada 7 detik.</li> <li>10. Atur parameter Waktu Pendinginan pada 20 detik.</li> <li>11. Atur parameter Suhu Mold pada 35°C.</li> <li>12. Atur parameter Suhu Injeksi pada 185°C.</li> <li>13. Atur parameter Kecepatan Injeksi pada 35 mm/s.</li> <li>14. Produk diinspeksi secara internal dengan melihat secara visual.                      Bentuk                      Sempurna terisi penuh sesuai cetakan                      Tidak terdapat cekungan                      Permukaan                      Tidak terdapat goresan</li> </ol>			



- Tidak terdapat permukaan gosong
- Tidak terdapat titik hitam
- Tidak terdapat semburan
- Garis pertemuan tidak terlalu panjang
- Warna
- Warna tidak belang
- 15. Setiap 5 kali setelah melepaskan produk dari  *mold*, semprot bagian dalam  *mold* dengan  *mold release*.
- 16. Buang  *flash* yang terdapat pada produk.

### Analisis dan Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan  *level sigma* selama eksperimen konfirmasi produk cermin kombinasi, diperoleh nilai  *level sigma* sebesar 4,13. Nilai  *level sigma* menunjukkan bahwa terdapat peluang terjadinya produk cacat sebesar 4.333,33 DPMO. Hasil eksperimen juga menunjukkan kenaikan nilai  *sigma* dengan selisih sebesar 0,41. Oleh karenanya dapat disimpulkan bahwa perbaikan kualitas dengan menentukan parameter mesin  *injection molding* untuk produksi cermin kombinasi mampu meningkatkan  *level sigma* sebesar 0,41.

Lamanya waktu pendinginan ( *cooling time*) berpengaruh dalam meminimalkan produk cacat cermin kombinasi, khususnya jenis cacat  *shrink mark*. Hal ini terjadi karena waktu pendinginan menjadi penentu besar kecilnya penyusutan pada sebuah produk yang telah diinjeksi dalam keadaan panas meleleh menuju pada keadaan dingin padat, sehingga semakin lama waktu pendinginan akan meminimalkan penyusutan yang dapat berdampak pada terbentuknya cekungan pada produk.

Tekanan tahan ( *holding pressure*) berpengaruh pada saat proses  *packing* (pengemasan/transisi cair ke padat) bahan baku terhadap cetakan.  *Holding pressure* perlu dijaga dengan tekanan yang sesuai, sehingga bentuk dari produk akan sesuai dengan  *dies/mold*. Interaksi antara faktor waktu pendinginan dan faktor tekanan tahan tidak berpengaruh karena tidak adanya hubungan antara faktor-faktor tersebut, sehingga tidak mempengaruhi timbulnya produk cacat cermin kombinasi.

Walaupun terdapat peningkatan nilai  *sigma* dan penurunan nilai DPMO, penelitian lebih lanjut perlu dilakukan. Usulan nilai  *parameter* faktor waktu pendinginan optimal selama 20 detik akan menambah waktu siklus produksi cermin kombinasi. Jika sebelum proses perbaikan ( *improvement*) waktu penyelesaian selama 1,15 menit kini menjadi 1,40 menit.  *Output* produk akan berkurang sebanyak 50 buah, dengan total produk yang dapat diproduksi dalam sehari kerja (waktu efektif produksi dalam sehari kerja adalah 315 menit ~ 5,25 jam) adalah 225 buah. Penggunaan alternatif lama waktu pendinginan pada taraf 2 selama 16 detik dinilai masih layak digunakan, karena lamanya waktu pendinginan masih berada dalam minimal waktu pendinginan secara teoritis. Produk yang dihasilkan sebanyak 237 unit, dengan rata – rata produk cacat yang dihasilkan memiliki selisih sebesar 0,7 dari perlakuan taraf ketiga. Oleh karenanya perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk waktu pendinginan selama 16 detik.

### Daftar Notasi

- S =  *Severity*
- O =  *Occurance*
- D =  *Detection*
- RPN =  *Risk Priority Number*
- S =  *Cooling Time (sec)*
- T =  *Product Thickness (mm<sup>2</sup>)*
- $\alpha$  =  *Thermal Diffusivity Material (mm<sup>2</sup>/s)*
- Tr =  *Ejection Temperature (°C)*
- Tm =  *Mold Temperature (°C)*
- Tc =  *Cylinder Temperature (°C)*

### Daftar Pustaka

- A.C. Scheller, T.T.S. Zomer, P.A.C. Miguel. (2017). Lean Six Sigma in developing countries: evidence from a large Brazilian manufacturing firm.  *International Journal of Lean Six Sigma* Vol. 12 No. 1, 2021 pp. 3-22 © Emerald Publishing Limited 2040-4166 DOI 10.1108/IJLSS-09-2016-0047.
- Ballman, R., & Shusman, T. (1959). Easy way to calculate injection molding set-up time.  *Modern Plastic*.
- Dakshinamoorthi, M., Ghazaly, N., Vidhya, R. (2014). Minimization of Sink Mark Defects In Injection Molding Process – Taguchi approach.  *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2.
- Departemen Perindustrian dan Perdagangan RI. (2003). Rencana Induk Pengembangan Industri Kecil Menengah 2002-2004.

- Jiju Antony, Maneesh Kumar, Christian N. Madu, (2005), "Six sigma in small- and medium-sized UK manufacturing enterprises: Some empirical observations", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 22 Iss: 8 pp. 860 - 874
- Kandil, O., R.A.E. Aziz. (2017). Evaluating the supply chain information flow in Egyptian SMEs using Six Sigma : A case study. *International Journal of Lean Six Sigma* Vol. 12 No. 1, 2021 pp. 120-148 © Emerald Publishing Limited 2040-4166 DOI 10.1108/IJLSS-10-2016-0066.
- Pyzdek, T., Keller, P. A. (2010). *The Six Sigma Handbook*. Mc Graw Hill.
- Snee, R.D. (2004), "Six sigma: the evolution of 100 years of business improvement methodology", *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, Vol. 1 No. 1, pp. 4-20.
- V. Swarnakar., A.K. Tiwari., A.R. Singh. (2020). Evaluating critical failure factors for implementing sustainable lean six sigma framework in manufacturing organization : A case experience. *International Journal of Lean Six Sigma* Vol. 11 No. 6, 2020 pp. 1069-1104 © Emerald Publishing Limited 2040-4166 . DOI 10.1108/IJLSS-05-2019-0050.

# Sistem Aplikasi Terintegrasi Pelaporan Keadaan Darurat di Jalan tol Berbasis NodeMCU

Griffani Megiyanto Rahmatullah<sup>1</sup>, Andry Haidar<sup>2</sup>, Idhamartya Wulani<sup>3</sup>, Aldiyans Nurcahyo<sup>4</sup>, dan Ajeng Denita Khoerunnisa<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknik Telekomunikasi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia

<sup>1</sup>[griffani.megiyanto@polban.ac.id](mailto:griffani.megiyanto@polban.ac.id), <sup>2</sup>[andry.haidar@polban.ac.id](mailto:andry.haidar@polban.ac.id), <sup>3</sup>[idhamartya.wulani.tkom18@polban.ac.id](mailto:idhamartya.wulani.tkom18@polban.ac.id),

<sup>4</sup>[aldiyans.nurcahyo.tkom19@polban.ac.id](mailto:aldiyans.nurcahyo.tkom19@polban.ac.id), <sup>5</sup>[ajeng.denita.khoerunnisa.tkom19@polban.ac.id](mailto:ajeng.denita.khoerunnisa.tkom19@polban.ac.id)

## Abstrak

Keadaan darurat di jalan tol merupakan sebuah kejadian yang terjadi secara tiba-tiba dan diperlukan proses penanganan yang cepat dan tepat. Nomor *hotline* di jalan raya masih digunakan sebagai sistem pelaporan, tetapi sering mengalami nada sibuk dan hanya mengandalkan mode GSM. Tujuan dari penelitian ini adalah membuat inovasi untuk mempermudah melaporkan keadaan darurat dengan cepat dan tepat di jalan tol. Teknologi internet dipilih karena internet merupakan komunikasi global jarak jauh yang terbuka dan GSM dipilih karena tidak semua lokasi terdapat jaringan internet. Cara kerja sistem ini yaitu pengguna jalan tol menekan salah satu *push button* sesuai keadaan darurat yang dialami, lalu mikrokontroler akan mengaktifkan GPS untuk mendeteksi lokasi pelapor, dan mengirimkan ke instansi terkait melalui aplikasi android, SMS, atau *e-mail*. Ketika data berhasil dikirim, maka pada LCD menampilkan pemberitahuan. Pada pengujian didapatkan hasil kesalahan GPS sebesar 34%, sedangkan *push button* sebesar 0%, proses pengiriman dan penerimaan data memiliki toleransi waktu yang tidak lebih dari 15 detik. Dari pengujian dapat disimpulkan bahwa realisasi alat dan aplikasi sudah sesuai dengan spesifikasi yang dirancang.

Kata kunci: GPS, GSM, Jalan tol, Keadaan Darurat, NodeMCU

## Abstract

An emergency on a highway is an incident that occurs suddenly and requires a fast and precise handling process. Hotline numbers on highways are still used as a reporting system but often experience busy tones and only rely on GSM mode. The purpose of this research is to make innovations to make it easier to report emergencies quickly and accurately on highways. Internet technology was chosen because the internet is an open long-distance global communication and GSM was chosen because not all locations have internet networks. The system works is that the highway users press one of the pushbuttons according to the emergency experience, then the microcontroller will activate the GPS to detect the location of the reporter and send it to the relevant agencies via the android application, SMS, or email. When the data is successfully sent, the LCD displays a notification. In testing, the results of the GPS error were 34%, while the push button was 0%, the process of sending and receiving data has a time tolerance of no more than 15 seconds. From the test, it can be concluded that the realization of the tools and applications is in accordance with the designed specifications.

Keywords: Emergency, GPS, GSM, Highway, NodeMCU

## 1. Pendahuluan

Keadaan Darurat adalah berubahnya suatu kegiatan/keadaan atau situasi yang semula normal menjadi tidak normal sebagai akibat dari suatu peristiwa atau kejadian yang tidak diduga atau tidak dikehendaki terjadi secara mendadak dan tidak terduga, dapat terjadi dimana saja, dan kapan saja yang dapat menimbulkan dampak negatif, dapat menghentikan atau mengganggu jalannya proses operasi, untuk itu diperlukan operasi penanggulangan segera (Anon., 2019). Mengutip situs Kominfo “Setiap jam, rata-rata 3 orang meninggal akibat kecelakaan jalan di Indonesia. Faktor penyebab terbesar kecelakaan lalu lintas adalah 61% karena faktor manusia (terkait dengan kemampuan serta karakter pengemudi) karena faktor kendaraan (terkait dengan pemenuhan persyaratan teknik laik jalan), dan disebabkan oleh faktor prasarana dan lingkungan” (Marroli, 2018). Mengingat kejadian tak terduga bisa menimpa kapan pun, maka menyimpan nomor darurat mobil menjadi hal yang wajib dilakukan. Pada jalan tol tersedia nomor *hotline* agar

penanganan keadaan darurat tidak terhambat. Namun, sering sekali *hotline* yang berada di jalan tol dalam keadaan sibuk sehingga tidak dapat dilaporkan situasi yang terjadi. Adapun hambatan lain yang terjadi ketika pengendara yang tidak memiliki pulsa untuk melakukan panggilan tersebut atau kondisi pengendara tidak dapat mengingat nomor *hotline*, sehingga tidak dapat menyampaikan situasi daruratnya.

Penerapan mekanisme pelaporan keadaan darurat pada jalan tol sebagai komponen teknologi utama dalam modernisasi infrastruktur

### Info Makalah:

Dikirim : 02-10-21;

Revisi 1 : 03-26-21;

Revisi 2 : 04-23-21;

Revisi 3 : 05-16-21;

Revisi 4 : 07-26-21;

Diterima : 07-31-21.

### Penulis Korespondensi:

Telp : +62-857-946-694-451

e-mail : [idhamartya.wulani.tkom18@polban.ac.id](mailto:idhamartya.wulani.tkom18@polban.ac.id)

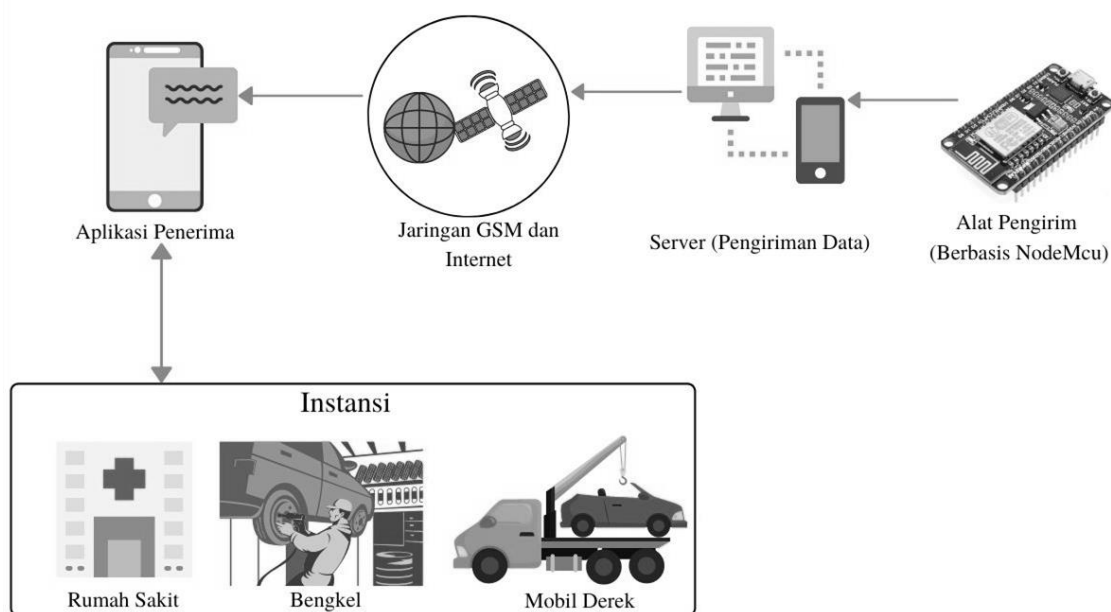
jalan tol untuk mempercepat proses penanganan pernah dilakukan dengan beberapa teknologi, diantaranya penggunaan aplikasi android (Hidayat, 2016) (Anshari, 2015) (Saputra & Supangkat, 2019), *Service Oriented Architecture* (Taufik & Widodo, 2015), VoIP (Maulana & MT, 2015), *Location Based Services* (Retnoningsih, 2016) (Wijaya, 2019) (Supriyadi, 2015), *Government Radio Network* (Riza, et al., 2019). Solusi yang pertama diterapkan pada lingkungan rumah. Sistem yang digunakan sangat mudah dan cukup sederhana. Namun, belum ada *client server* yang bertugas menghubungkan pengguna aplikasi dengan pihak yang sedang dibutuhkan sesuai dengan kondisi darurat saat itu. Solusi kedua, sistem mampu meminimalkan kegagalan notifikasi dengan melakukan pemanggilan ulang secara otomatis. Namun, belum ada sistem keamanan kepada pihak yang mengakses sistem tersebut. Sistem ini diimplementasikan pada tempat keramaian, yaitu bandara. Solusi ketiga diimplementasikan pada lingkungan rumah. Sistem yang dirancang sangat mudah dikembangkan dan dikonfigurasi sesuai kebutuhan serta memiliki cakupan jaringan yang cukup luas. Namun, proses pembuatan system ini cukup sulit dan memerlukan biaya yang cukup besar. Solusi keempat dapat berkerja dalam kondisi *hybrid* dan *offline* secara optimal. Namun, dalam mendeteksi lokasi masih cukup lama dan dibutuhkan pengurangan kapasitas *file*. Sistem yang dirancang ini diimplementasikan pada lingkungan rumah. Solusi kelima, sistem yang digunakan sudah cukup baik karena hanya dengan satu *Base Station* dapat melayani cakupan jaringan yang cukup luas. Namun, proses pembuatannya cukup rumit dan memerlukan biaya yang cukup besar. Sistem ini dirancang hanya untuk lingkungan rumah. Solusi-solusi yang pernah ada memiliki kesamaan yaitu sistem yang dirancang tidak diimplementasikan.

Tujuan penelitian yang dilakukan adalah membuat *prototype* alat pelaporan keadaan darurat yang dapat mengirimkan laporan data dan titik lokasi keadaan darurat yang terjadi dengan cepat. *Prototype* alat pelaporan keadaan darurat merupakan inovasi dalam mengatasi permasalahan pengguna jalan tol untuk pelaporan keadaan darurat. Dapat dikatakan bahwa inovasi tersebut mendukung Peraturan Pemerintah No. 15 Tahun 2005 Pasal 7 Ayat 1 yang berisi “Pada setiap jalan tol harus tersedia sarana komunikasi, sarana deteksi pengamanan lain yang memungkinkan pertolongan dengan segera sampai ke tempat kejadian, serta upaya pengamanan terhadap pelanggaran, kecelakaan, dan gangguan keamanan lainnya”.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Persiapan Realisasi Perangkat Keras

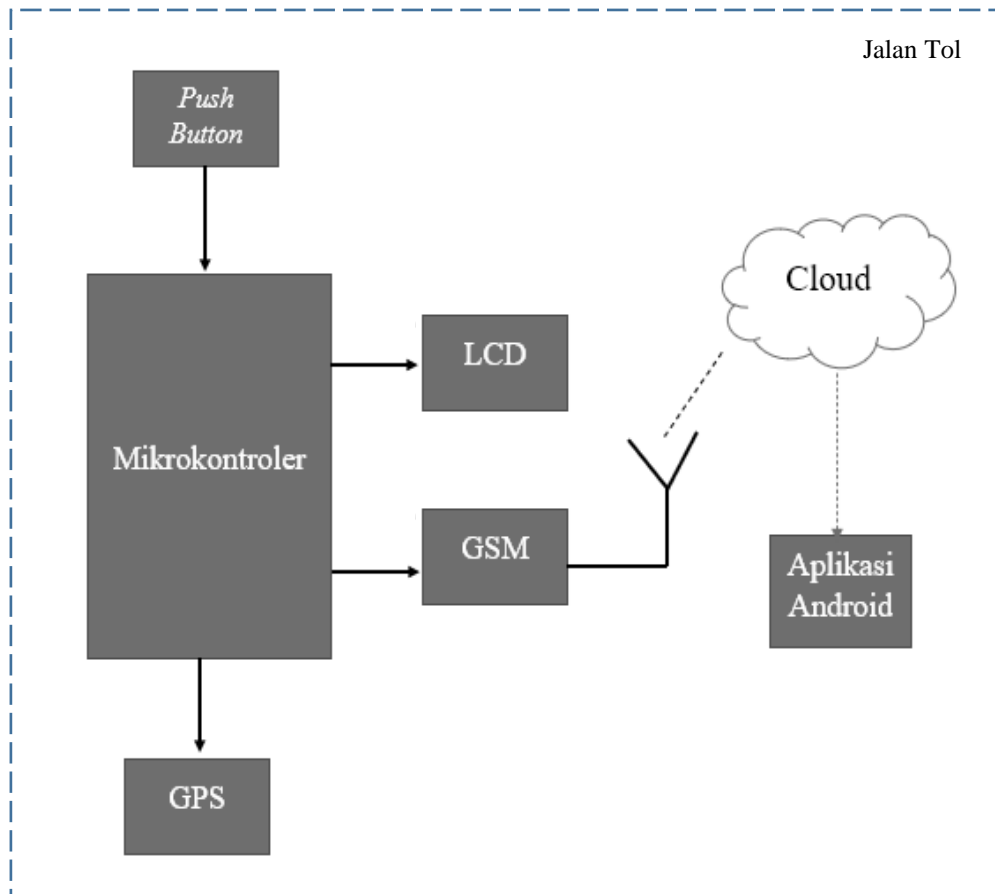
Dilakukan identifikasi masalah terlebih dahulu untuk menemukan pemecahan masalah pada alat yang akan dibuat. Mengetahui cara aplikasi android dapat menerima pelaporan keadaan darurat di jalan tol dari alat yang akan dibuat. Dalam perancangan, terdapat beberapa bagian yang perlu dirancang, yaitu perancangan casing, penempatan *push button*, mikrokontroler, GSM, GPS, dan komponen lainnya. Perancangan aplikasi yang digunakan pada pembuatan sistem. Adapun terdapat beberapa prasyarat dalam merancang sistem ini yang meliputi alat berbentuk kotak serta kuat terhadap guncangan namun mudah jika ingin dilakukan *troubleshooting* rangkaian, sistem dapat membaca data keadaan darurat yang diinputkan pengguna, sistem selalu *available* pada setiap keadaan, dan sistem bisa membaca *longtitude* dan *latitude* secara akurat serta mengirimkan data tersebut ke aplikasi penerima setiap ada pelaporan keadaan darurat.



Gambar 1. Ilustrasi Sistem Keseluruhan

Ilustrasi sistem kerja dari alat yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 1, pada saat data laporan keadaan darurat sudah diolah oleh mikrokontroler yaitu komponen nodeMCU. Berikutnya, dengan memanfaatkan *server* yang dimiliki oleh aplikasi Blynk, jenis keadaan darurat di kirimkan melalui jaringan GSM dan Internet. Data yang dikirimkan akan diterima oleh instansi terkait sesuai dengan keadaan darurat yang di alami. Instansi tersebut diantaranya adalah rumah sakit yang diperlukan untuk keadaan darurat orang sakit, bengkel (layanan bantuan jalan) untuk keadaan darurat pecah ban, dan mobil derek untuk keperluan keadaan darurat kecelakaan. Adapun instansi tersebut akan memberi respons balik pada aplikasi berupa pemberitahuan bahwa pelaporan sudah diterima.

Metode pada tahap persiapan, semua komponen disiapkan dan diuji untuk memastikan keandalannya. Pada perancangan perangkat keras dilakukan sistem penginputan data dengan *push button* dan pembacaan titik lokasi dengan modul GPS. Berikutnya, dilakukan pengiriman data melalui modul GSM dan memanfaatkan jaringan Internet untuk selanjutnya diterima oleh aplikasi penerima. Blok sistem perancangan perangkat keras, lebih jelasnya, ditunjukkan pada Gambar 2.



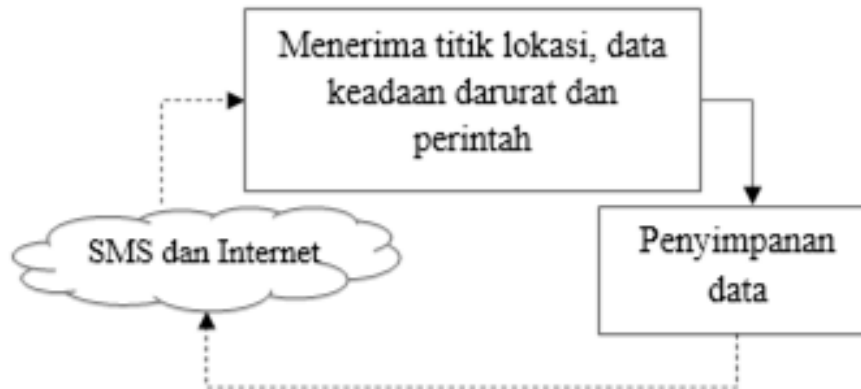
Gambar 2. Diagram Blok Sistem

Pada bagian mikrokontroler yang berupa nodeMCU, berfungsi sebagai pengolahan dari 2 proses yang masuk ke mikrokontroler dan keluar dari mikrokontroler. Pada proses data masuk oleh *push button* dan GPS, *push button* sebagai input data keadaan darurat dan GPS sebagai titik lokasi keadaan darurat. Sedangkan, untuk proses keluar data berupa tampilan yang dilakukan oleh komponen LCD dan modul GSM. LCD sebagai *output* indikator keberhasilan proses pengiriman data, sedangkan modul GSM sebagai media pengiriman. Data dikirimkan ke aplikasi penerima dengan memanfaatkan jaringan internet dan modul GSM. Seluruh sistem yang dirancang akan diimplementasikan pada jalan tol yang bertujuan untuk memudahkan dan mempercepat proses pelaporan keadaan darurat. Keseluruhan proses yang terjadi pada sistem merupakan komunikasi *wireless*, sehingga diberi garis putus-putus pada Gambar 2 yang menandakan sistem yang dirancang merupakan komunikasi *wireless*.

## 2.2 Persiapan Realisasi Perangkat Lunak

Persiapan realisasi perangkat lunak digunakan *software* arduino IDE yang berfungsi sebagai program untuk mikrokontroler yang akan digunakan. Seluruh komponen yang terhubung dengan mikrokontroler, agar dapat berjalan sesuai dengan fungsinya, perlu dilakukan pemrograman terlebih dahulu dengan bahasa pemrograman yang digunakan

adalah bahasa C. Pada tahap persiapan, aplikasi memerlukan komponen berupa *smartphone*. Sistem yang dibuat memanfaatkan aplikasi Blynk untuk dapat melakukan proses seperti pada Gambar 2.



Gambar 3. Diagram Blok Sistem Penerima

Proses pada aplikasi dimulai dengan menerima notifikasi berupa titik lokasi dan keadaan darurat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Data pelaporan yang masuk kemudian dilakukan penyimpanan data sebagai bukti atau arsip pada server yang dimiliki oleh aplikasi Blynk. Kegunaan penyimpanan data tersebut sebagai riwayat keadaan darurat yang terjadi di jalan tol, baik yang dapat ditangani maupun yang tidak. Semua proses tersebut dilakukan dengan memanfaatkan jaringan GSM dan Internet. Untuk dapat melakukannya, sistem tersebut memanfaatkan aplikasi Blynk.

Pada bagian aplikasi Blynk, dilakukan desain pada peletakan menu-menu yang dibutuhkan seperti menu *latitude* dan *longitude*, menu keadaan darurat, dan peta lokasi yang secara otomatis, apabila peta tersebut diklik, maka akan tersambung pada google maps.

```

BlynkTimer timer;

float spd;
float sats;
String bearing;

char auth[] = "gsz00WbOl5wqIFJnhL4rz-Xx4z3JctTr";
char ssid[] = "AndroidAP";
char pass[] = "dihati16";

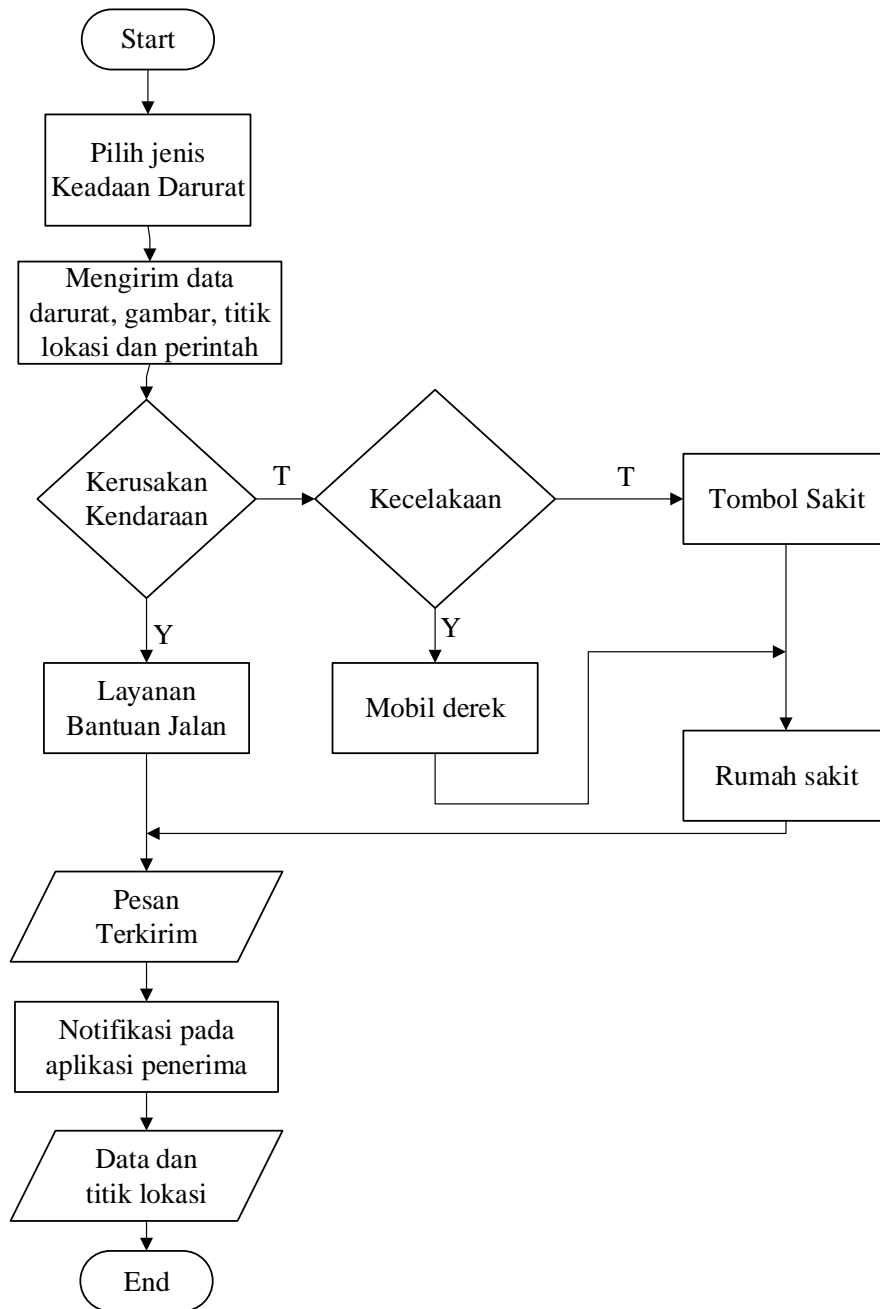
//unsigned int move_index;
unsigned int move_index = 1;
  
```

Gambar 4. Cara terhubung Alat dengan Aplikasi Blynk

Alat yang akan dibuat tidak dapat berfungsi dengan baik apabila tidak terhubung dengan aplikasi Blynk. Pada *software IDE* dilakukan penulisan *token* dari aplikasi Blynk seperti pada Gambar 4. Fungsi dari token tersebut menghubungkan aplikasi Blynk yang sudah dibuat dengan perangkat keras karena sistem yang dirancang berupa aplikasi instansi terkait saja yang menerima notifikasi, maka dari itu setiap instansi memiliki token yang berbeda. Selain menuliskan token pada *software arduino IDE*, sistem yang dirancang mengirimkan juga data ke *e-mail* instansi terkait, maka alamat email dari instansi terkait perlu dituliskan pula pada program di *software arduino IDE*.

### 2.3 Algoritma yang Digunakan

Pada suatu perancangan dibutuhkan skema algoritma yang akan dirancang. Algoritma tersebut menjelaskan dimulai dari sistem dinyalakan, memproses data, hingga pada tahap pengiriman data. Pada sistem pelaporan keadaan darurat yang dirancang dibuatlah algoritma dengan menggunakan *flowchart*.



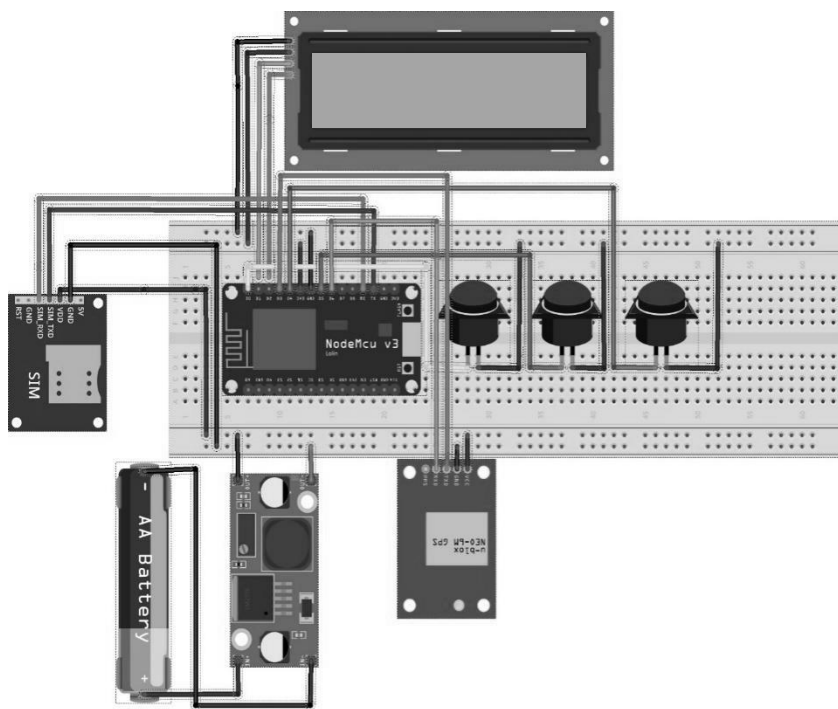
Gambar 5. Flowchart Keseluruhan Sistem

Gambar 5 merupakan *flowchart* logika keseluruhan sistem yang telah dibuat. Proses ini dimulai dengan sistem dihidupkan, yaitu ketika catu daya diaktifkan serta keadaan aman akan terdeteksi karena tidak ada penginputan data keadaan darurat. Ketika terjadi pelaporan keadaan darurat, maka pelapor akan memilih jenis keadaan darurat yang dialami. Pada alat yang dirancang, jenis keadaan darurat yang tersedia diantaranya kerusakan kendaraan, kecelakaan, dan sakit. Bersamaan dengan proses pemilihan jenis keadaan darurat, GPS akan membaca titik lokasi. Setelah jenis darurat dipilih, data tersebut dikirimkan, serta aplikasi penerima sudah siap untuk menerima data.

Adapun pada saat proses pengiriman, sistem akan membaca data keadaan darurat dan titik lokasi terlebih dahulu sebagai acuan tujuan data tersebut dikirimkan agar penerima menerima notifikasi. Penerima notifikasi adalah instansi yang terkait langsung dengan keadaan darurat dan jaraknya paling dekat dengan lokasi kejadian. Untuk instansi terkait pada alat yang dirancang, diantaranya layanan bantuan jalan untuk kondisi keadaan darurat kerusakan kendaraan seperti pecah ban atau ban bocor, mobil derek dan rumah sakit untuk kondisi darurat kecelakaan, serta rumah sakit khusus untuk keadaan darurat pengguna jalan tol yang mengalami sakit. Pada aplikasi penerima akan mendapatkan notifikasi berupa jenis keadaan darurat dan titik lokasi darurat tersebut terjadi

Pada jenis keadaan darurat yang tidak dipilih maka alat tidak akan melakukan proses pembacaan data jenis darurat dan tidak pula melakukan pengiriman ke instansi terkait. Sebagai indikator bahwa pengiriman berhasil dilakukan, maka dirancang *output* pada LCD dengan menampilkan “Pesan Terkirim”. Pesan tersebut tidak dapat ditampilkan ketika pengiriman gagal dilakukan. Ketika pengiriman gagal dilakukan, maka yang muncul pada LCD berupa layar kosong. Ketika alat sudah berhasil melakukan pengiriman data, sistem pada alat akan kembali seperti awal atau posisi siap menerima laporan keadaan darurat.

**2.4 Realisasi**



Gambar 6. *Wiring Diagram* Keseluruhan

Tabel 1. Keterangan Gambar 6

Modul GPS	Modul GSM	Push Button	LCD
TX = D3	TX = RX	1 = D0	SDA = D1
RX = D6	RX = TX	2 = D5	SCL = D2
		3 = D6	

Rancangan *wiring diagram* dilakukan dengan aplikasi *fritzing* menggunakan komponen nodeMCU, SIM 800L, GPS, *push button*, Catu daya baterai, modul *step-down*, dan LCD seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Adapun proses pengiriman ditandai dengan tampilan pada LCD. Proses pengiriman dan pembacaan data tidak dapat dilakukan secara bersama-sama dikarenakan nodeMCU bekerja secara serial, artinya program akan dilakukan secara berurutan.

**3. Hasil dan Pembahasan**

Pada saat proses perancangan sudah dilakukan, tahap pengujian kehandalan dari alat yang sudah dirancang perlu dilakukan yang bertujuan untuk mengetahui apakah alat yang dirancang masih diperlukan perbaikan atau tidak.

**Pengujian Push Button**

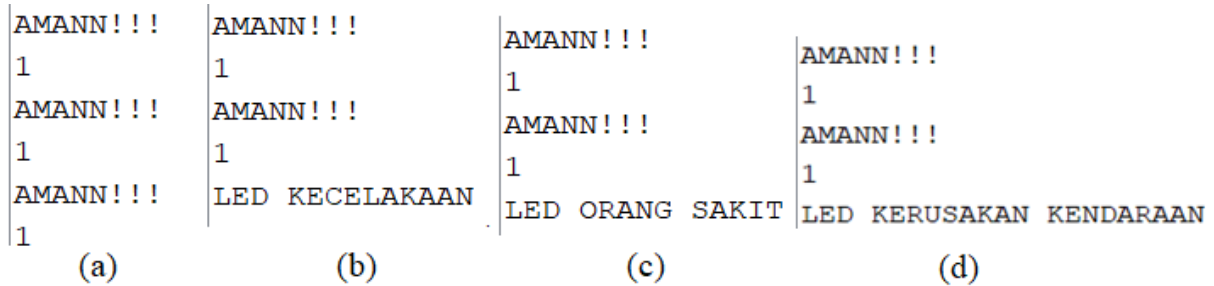
Pengujian *push button* diperlukan karena *push button* merupakan komponen yang cukup penting dalam alat yang dirancang ini. *Push button* berfungsi sebagai *trigger* untuk keseluruhan komponen. Apabila pada *push button* tidak dilakukan pengujian terlebih dahulu, maka dikhawatirkan sistem yang dirancang tidak akan dapat bekerja atau berfungsi sesuai dengan yang diinginkan.

Pengujian *push button* dilakukan untuk mengetahui akurasi dari pembacaan *push button* serta kecepatan waktu pembacaan data. Skenario pengujian dilakukan sebanyak 6 kali dan hasil pengujian ditunjukkan oleh Tabel 2.



Tabel 2. Hasil Pengujian *Push Button*

No	<i>Push Button</i>	Waktu terbaca
1	Kecelakaan	6 detik
2	Kerusakan Kendaraan	7 detik
3	Orang Sakit	6 detik
4	Dua Kali Ditekan	1 detik
5	2 <i>Push Button</i> Ditekan	2 detik
6	Tidak ditekan	1 detik



Gambar 7. Tampilan di *Software* (a) kondisi aman, (b) kondisi kecelakaan, (c) kondisi orang sakit, dan (d) kondisi kerusakan kendaraan

Dari hasil pengujian, diperoleh hasil yang sesuai yaitu penekanan salah satu *push button* akan menginputkan salah satu keadaan darurat dan menyalakan LED dengan waktu pembacaan data rata-rata 6 detik. Apabila dilakukan penekanan lebih dari 1 *push button* maka data keadaan darurat tidak dapat dibaca atau kondisi yang terbaca adalah aman dengan waktu pembacaan data selama 1 detik seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

### Pengujian GPS

Pengujian GPS diperlukan untuk mengetahui akurasi dari pembacaan titik lokasi yang sudah diprogram sebelumnya. Pengujian telah dilakukan pada 3 tempat yang berbeda dan hasilnya ditunjukkan oleh Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian GPS

No	Tempat	GPS Pada Aplikasi Google Maps	GPS Sistem	Waktu penerimaan	Error
1	Jl. Kartawigenda No. 16 Subang	-6,5653351 107,7590373	-6,5653351 107,7590373	14 detik	0%
2	Pada ruangan tertutup	-6.4593248 107.7555888	0.00,0.00	16 detik	100%
3	Perumahan BTN Subang	-7.12696554 108.53818269	-7.12696554 108.53818269	15 detik	0%

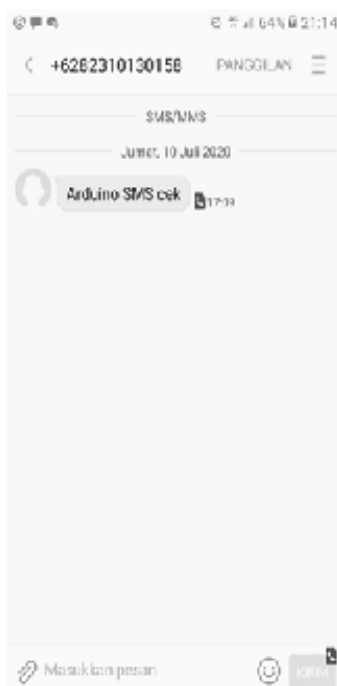
Dari ketiga variasi pengujian GPS yakni pada ruangan terbuka dan tertutup, didapatkan rata-rata kesalahan pada pembacaan GPS sebesar 34% bila dibandingkan dengan GPS pada aplikasi Google Maps. Kesalahan 100% pada percobaan terjadi karena modul GPS yang sulit mendapatkan sinyal pada ruangan tertutup sehingga kerja dari modul GPS tidak maksimal.

### Pengujian SMS Menggunakan SIM800 dan LCD

Pengujian modul GSM SIM 800 dan LCD bertujuan untuk mengetahui kinerja dan kecepatan respon dalam penerimaan serta pengiriman laporan keadaan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian GSM

No	<i>Push Button</i>	Waktu Pengiriman	Waktu Penerimaan	Keterangan
1	Kecelakaan	6 detik	6 detik	Menerima pesan
2	Kerusakan Kendaraan	7 detik	8 detik	Menerima pesan
3	Orang Sakit	6 detik	7 detik	Menerima pesan



Gambar 8. Hasil Pengujian SMS

Dari hasil pengujian diperoleh data kecepatan pengiriman dan penerimaan SMS, bahwa proses pengiriman dan penerimaan SMS terjadi *delay* meskipun tidak terlalu besar. Waktu pengiriman dan penerimaan pada 3 kali pengujian didapatkan hasil yang berbeda-beda, hal ini dikarenakan modul GSM SIM 800 memerlukan sinyal yang cukup stabil untuk melakukan pengiriman dan penerimaan data.

### Pengujian Aplikasi dan LCD

Pengujian dilakukan untuk mengetahui keluaran dari LCD dan aplikasi android yang sudah di program sebelumnya. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Aplikasi dan LCD

No	Push Button	Waktu Pemberitahuan Pesan Terkirim (LCD)	Waktu pesan diterima oleh aplikasi	Perbandingan Waktu
1	Kecelakaan	6 detik	14 detik	0,57%
2	Kerusakan Kendaraan	7 detik	16 detik	0,56%
3	Orang Sakit	6 detik	15 detik	0,6%
4	Dua Kali Ditekan	-	-	-
5	2 Push Button Ditekan	-	-	-
6	Tidak ditekan	-	-	-

Dari hasil pengujian didapatkan bahwa komponen LCD sudah berfungsi dengan baik. Hal ini dibuktikan ketika terjadi proses pengiriman, pada LCD akan menampilkan “Pesan Terkirim” yang berarti pesan terkirim dengan waktu rata-rata 6 detik. Kemudian, pada aplikasi android, instansi akan menerima data dengan waktu penerimaan data rata-rata 15 detik, perbandingan dari waktu pemberitahuan dengan pesan yang diterima tidak melebihi dari 1% yang berarti kecepatan proses pengiriman cukup baik. Namun, ketika tidak terjadi proses pengiriman maka pada layar LCD tidak menampilkan pesan apapun atau dapat dikatakan posisi alat sedang dalam posisi siap menerima input jenis keadaan darurat karena alat tidak sedang melakukan proses pengiriman data. Dengan kondisi LCD yang berfungsi dengan baik maka pengguna bisa membedakan keadaan alat pelaporan ketika sedang dalam proses pengiriman data atau sedang siap melakukan input laporan keadaan darurat. Jika tidak ada indikator tersebut, maka akan menyulitkan pengguna karena penginputan laporan keadaan darurat yang dilakukan secara bersamaan tidak akan di proses oleh alat. Ketika kondisi LCD tersebut mati, maka aplikasi android menampilkan data kondisi aman.

### Pengujian Keseluruhan

Pengujian dilakukan untuk mengetahui seluruh komponen sudah saling terhubung dan dapat mengeluarkan *output* sesuai fungsinya. Pengujian keseluruhan dilakukan sebanyak 4 kali seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Keseluruhan

No	Push Button	Waktu Pembacaan GPS	Waktu Penerimaan data (SIM800)	Waktu Pengiriman data (LCD)
1	Kecelakaan	14 detik	6 detik	6 detik
2	Kerusakan Kendaraan	16 detik	8 detik	7 detik
3	Orang Sakit	15 detik	7 detik	6 detik
4	Tidak ditekan	-	-	-

```

LED ORANG SAKIT
www.google.com/maps/place/0.00,0.00
DEBUG:SMS TEST
ATT: >
RIC:

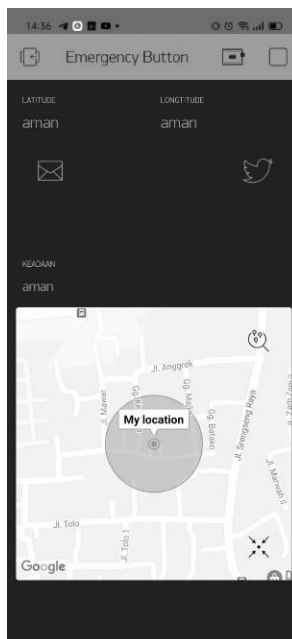
SMS sent OK
    
```

Gambar 9. Tampilan di Software untuk Pengujian Keseluruhan

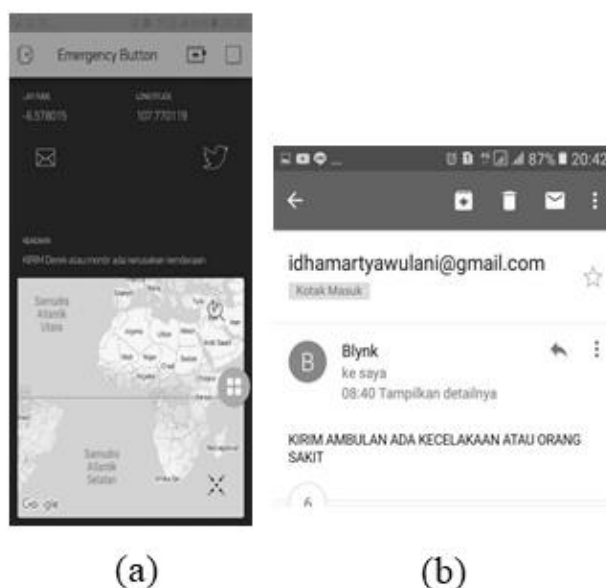
Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap komponen sudah berfungsi sesuai yang diharapkan. Hal tersebut dibuktikan ketika adanya laporan keadaan darurat yang diinputkan melalui *push button* akan mengaktifkan GPS untuk membaca titik lokasi pelapor. Sedangkan modul GSM akan bersiap melakukan pengiriman data dan mengaktifkan LCD sebagai indikator ketika pengiriman data berhasil dilakukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Selain itu dari hasil pengujian didapatkan setiap komponen dalam melakukan proses fungsinya memerlukan waktu yang berbeda-beda.

**Penerimaan Data Pada Aplikasi**

Aplikasi yang telah dibuat pada penerima memanfaatkan aplikasi Blynk yaitu pada halaman utama terdiri dari *latitude*, *longtitude*, keadaan, dan google maps. Gambar 10 menunjukkan halaman utama atau kondisi ketika tidak ada pelaporan keadaan darurat, sedangkan pada Gambar 11 menunjukkan hasil pengujian ketika ada pelaporan keadaan darurat. Berdasarkan hasil pengujian, aplikasi memiliki kehandalan yang tinggi karena lokasi sebagai parameter utama menunjukkan posisi akurat.



Gambar 10. Halaman Utama Aplikasi



Gambar 11. Tampilan di Aplikasi (a) Blynk, (b) e-mail

## Kesimpulan

Dari perancangan dan simulasi sistem pelaporan keadaan darurat di jalan tol, dapat disimpulkan bahwa waktu pengiriman data memiliki toleransi waktu sebesar 6 detik. Untuk waktu penerimaan data melalui GSM memiliki toleransi waktu sebesar 7 detik. Sedangkan untuk aplikasi android, data dapat diterima dengan toleransi waktu 15 detik. Hal tersebut dipengaruhi oleh sinyal dari modul GSM. Tingkat akurasi dari modul GPS dapat dikatakan cukup baik dengan besar kesalahan rata-rata 34% yang terjadi pada ruangan tertutup. Sedangkan untuk pengujian *push button*, besar kesalahan sebesar 0% dari 6 kali pengujian. Dengan melihat parameter tersebut dapat dikatakan sistem pelaporan keadaan darurat yang dirancang sudah dapat berkerja sesuai dengan fungsinya. Pengembangan lebih lanjut dapat memilih pencatutan daya yang tepat agar semua komponen pada sistem dapat beroperasi dengan stabil dan dilakukan dengan cara memanfaatkan teknologi *cloud based*.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung atas dukungan finansialnya pada penelitian ini. Penulis juga berterima kasih kepada teman – teman dan Dosen Program Studi Telekomunikasi Politeknik Negeri Bandung atas diskusinya yang bermanfaat.

## Daftar Pustaka

- Anon., 2019. *Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3)*. URL: <https://www.jasamargabalitol.co.id/tata-kelola/k3/>. Diakses 26 Maret 2021.
- Anshari, S., 2015. *Rancang Bangun Aplikasi Darurat Kota Makassar Berbasis Android*, Makassar: s.n.
- Hidayat, N., 2016. *Aplikasi Kondisi Darurat Lalu Lintas Di Perangkat Cerdas Android*, Yogyakarta: Amikom.
- Marroli, 2018. *Kominfo*. URL: [https://kominfo.go.id/index.php/content/detail/10368/rata-rata-tiga-orang-meninggal-setiap-jam-akibat-kecelakaan-jalan/0/artikel\\_gpr](https://kominfo.go.id/index.php/content/detail/10368/rata-rata-tiga-orang-meninggal-setiap-jam-akibat-kecelakaan-jalan/0/artikel_gpr). Diakses 23 Maret 2021.
- Maulana, M. R. & MT, P. K., 2015. *Aplikasi VoIP Based Emergency- Call dengan Pengaksesan IVR*, Surabaya: s.n.
- Presiden, R. I., 2005. *Peraturan Pemerintah Nomor 15 Tahun 2005 Tentang Jalan Tol*. Jakarta, bpjt.pu.
- Retnoningsih, 2016. *Aplikasi Informasi Telepon Darurat Menggunakan Android Berbasis Location Based Service (LBS)*, Bekasi: Semnastek.
- Riza, T. A., Mulyana, A. & Munadi, R., 2019. Analisis Penggunaan Government Radio Network (GRN) untuk Integrasi Sistem Komunikasi Public Protection and Disaster Relief (PPDR) di Kota Bandung. *TEKNIK*, Issue 2, pp. 99-105.
- Saputra, R. W. & Supangkat, S. H., 2019. *Quick Disaster Emergency Responses pada Pengembangan Kota Cerdas*. Bandung, Publication.
- Setyawibawa, I. & Goeritno, A., 2017. Rancang Bangun Sistem Komunikasi Radio Berbasis Digital Trunking Untuk Sarana Komunikasi Pada Pengelola Jalan Tol Trans Sumatera. *Prosiding SNATIF*, Volume IV, pp. 181-193.
- Supriyadi, T., 2015. Pemanfaatan Jaringan Seluler dan Jaringan Internet Untuk Sistem Keamanan Rumah dengan User Interface Berbasis Handpone Android. *Industrial Research Workshop dan National Seminar 2012*, pp. 186-194.

- Taufik, S. B. & Widodo, P. P., 2015. Perancangan Sistem Emergency Operation Center Berdasarkan Service Oriented Architecture : Kasus Bandar Udara Juanda Surabaya. *Seminar Nasional Inovasi dan Teknologi (SNIT)*, pp. 123-127.
- Wijaya, A., 2019. Pembuatan Aplikasi Panggilan Darurat Berbasis Android Menggunakan Location Based Services. *JSAI*, II(1), pp. 97-104.

# Rancang Bangun Purwarupa *Energy Harvesting* menggunakan Piezoelektrik sebagai Pembangkit Energi Listrik

Kusnandar<sup>1</sup>, Ni Ketut Hariyawati Dharmi<sup>2</sup>, dan Aisyah Nurul Khairiyah<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

<sup>1</sup>[koes\\_kusnandar@yahoo.com](mailto:koes_kusnandar@yahoo.com), <sup>2</sup>[niketuthd@yahoo.com](mailto:niketuthd@yahoo.com), <sup>3</sup>[nurul415@gmail.com](mailto:nurul415@gmail.com)

## Abstrak

Himbauan untuk menggunakan energi bersih dan berkelanjutan sebagai sumber energi alternatif meningkat dengan pesat lebih dari satu dekade terakhir. Hal itu dipicu oleh isu pencemaran lingkungan yang semakin tinggi, jumlah energi tak terbarukan yang terbatas, dan semakin lama semakin berkurang serta menjadi salah satu tujuan dari *Sustainable Development Goals* (SDGs) 2030. Sesuai prinsip kekekalan energi, energi tidak dapat digunakan sepenuhnya, selalu ada sebagian energi yang terbuang. Teknologi untuk memanfaatkan kembali energi yang “terbuang” tersebut menjadi sumber energi listrik disebut dengan pemanen energi. Makalah ini menguraikan tentang rancang bangun purwarupa sistem pemanen energi menggunakan piezoelektrik yang dipasang di lantai dan menghasilkan energi listrik saat mendapat tekanan. Purwarupa sistem tersusun dari deretan 16 piezoelektrik yang dibuat menjadi 4 baris dan dipasang secara paralel. Sistem dilengkapi dengan modul pemanen energi LTC358 dan modul *step-up booster* MT 3608. Hasil pengujian menunjukkan energi listrik berhasil disimpan dalam baterai. Daya maksimum yang dihasilkan sebesar 3,48 W setelah dilewatkan melalui penyearah gelombang penuh. Untuk jumlah injakan kaki yang sama terhadap deretan piezoelektrik, kenaikan pengisian tegangan baterai Li-Po 150 mAH lebih kecil dibandingkan dengan tipe 250 mAH.

Kata kunci: baterai Li-Po, deretan piezoelektrik, modul LTC358, modul *step up booster* MT 3608.

## Abstract

The call to use clean and sustainable energy as an alternative energy source has grown rapidly over the past decade. This was triggered by the issue of increasing environmental pollution, the limited and decreasing amount of non-renewable energy and became one of the goals of the 2030 Sustainable Development Goals (SDG). According to the principle of conservation of energy, energy cannot be fully utilized, there is always some energy wasted. The technology to reuse "wasted" energy into a source of electrical energy is called energy harvesting. This paper describes the design of a prototype energy harvesting system using a floor-mounted piezoelectric that generates electrical energy when stepped on. The system prototype is composed of 16 piezoelectric arrays which are made into 4 rows and installed in parallel. The system is equipped with the LTC358 energy harvester module and the MT 3608 step-up booster module. Test results showed electrical energy was successfully in the battery. The maximum power generated by the piezoelectric array after passing through a full-wave rectifier is 3.48 W. For the same number of footsteps against the piezoelectric array, the increase in charge of the Li-Po 150 mAH battery is smaller than that of the 250 mAH type.

Keywords: Li-Po battery, LTC358 energy harvester module, MT 3608 step up booster module, piezoelectric array

## 1. Pendahuluan

Himbauan untuk menggunakan energi bersih (*clean energy*) dan berkelanjutan sebagai sumber energi alternatif meningkat dengan pesat lebih dari satu dekade terakhir. Hal itu dipicu oleh isu pencemaran lingkungan yang semakin tinggi (misalnya limbah tenaga nuklir dan emisi bensin) dan jumlah energi tak terbarukan yang terbatas serta semakin lama semakin berkurang seperti minyak bumi, gas alam, dan batu bara (Najmurokhan dkk., 2017; Varadha & Rajakumar, 2018; Niasar *et al.*, 2020). Himbauan tersebut seiring dengan tujuan ke-7 dari SDGs 2030 yang menyatakan “*Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all*”. Pemerintah Republik Indonesia melalui Peraturan Pemerintah nomor 79 tahun 2014 mengeluarkan Kebijakan Energi Nasional yang mendukung pengembangan sumber energi baru dan terbarukan untuk meningkatkan rasio elektrifikasi.

Menurut prinsip kekekalan energi, energi dapat digunakan tetapi tidak bisa dikonsumsi seluruhnya, dan setelah pemakaian, semuanya berubah menjadi bentuk panas dan menjalar ke ruang angkasa. Selanjutnya ada jenis energi lain seperti getaran dan energi matahari yang biasanya terbuang percuma dalam bentuk energi kinetik dan panas. Energi yang terbuang tersebut sebenarnya memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif. Dewasa ini, beberapa upaya telah dilakukan untuk memanfaatkan kembali energi yang “terbuang” tersebut menjadi sumber energi listrik. Teknologi pemanfaatan energi seperti itu disebut dengan pemanen energi (*energy harvesting*) (Akinaga, 2020). Salah satu bentuk pemanen energi yang aktif dilakukan adalah dengan

### Info Makalah:

Dikirim : 10-22-20;  
Revisi 1 : 03-25-21;  
Revisi 2 : 05-21-21;  
Revisi 3 : 06-20-21;  
Revisi 4 : 09-15-21;  
Diterima : 10-12-21.

### Penulis Korespondensi:

Telp : +62-813-1370-4872  
e-mail : [koes\\_kusnandar@yahoo.com](mailto:koes_kusnandar@yahoo.com)

memanfaatkan getaran. Konversi energi getaran menjadi energi listrik dilakukan melalui tiga metode populer yaitu elektromagnetik, triboelektrik, dan piezoelektrik (Eghbali *et al.*, 2020). Diantara ketiga metode tersebut, piezoelektrik paling banyak digunakan untuk memanen energi getaran. Namun demikian, masalah efisiensi dan daya yang relatif kecil menjadi tantangan dalam membangun pemanen energi berbasis piezoelektrik (Varadha & Rajakumar, 2018; Eghbali *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020).

Beberapa penelitian telah dilakukan dalam konteks pemanenan energi getaran menggunakan piezoelektrik (Afif & Rini, 2017; Büyükkeskin *et al.*, 2019; Nechibvute *et al.*, 2012; Niasar *et al.*, 2020; Pratama dkk., 2015; Xu *et al.*, 2018; Yuliana dkk., 2020; Zebua dkk., 2019). Afif & Rini (2017) membuat purwarupa konverter energi berbasis material piezoelektrik dari polisi tidur di jalan untuk menyalakan lampu penerangan jalan umum, sedangkan Büyükkeskin *et al.* (2019) memanfaatkan material piezoelektrik untuk memanen energi angin untuk menghasilkan energi listrik. Nechibvute *et al.* (2012) memanen energi listrik dari bahan piezoelektrik untuk mendukung kerja sensor nirkabel. Pratama dkk. (2015) membuat purwarupa sepatu yang dilengkapi dengan bahan piezoelektrik dan menyimpan energi tekanan dari kaki saat melangkah dalam sebuah kapasitor. Sementara itu, Niasar *et al.* (2020) dan Xu *et al.* (2018) menguraikan potensi penggunaan material piezoelektrik dalam memanen energi di jalan tol. Yuliana dkk. (2020) memanen energi dari kebisingan yang dihasilkan mesin *winder* di sebuah pabrik pemintalan benang dan mengkonversikan menjadi energi listrik menggunakan deretan piezoelektrik, sedangkan purwarupa lainnya berupa konversi energi dari tetes air hujan memanfaatkan material piezoelektrik (Zebua dkk., 2019).

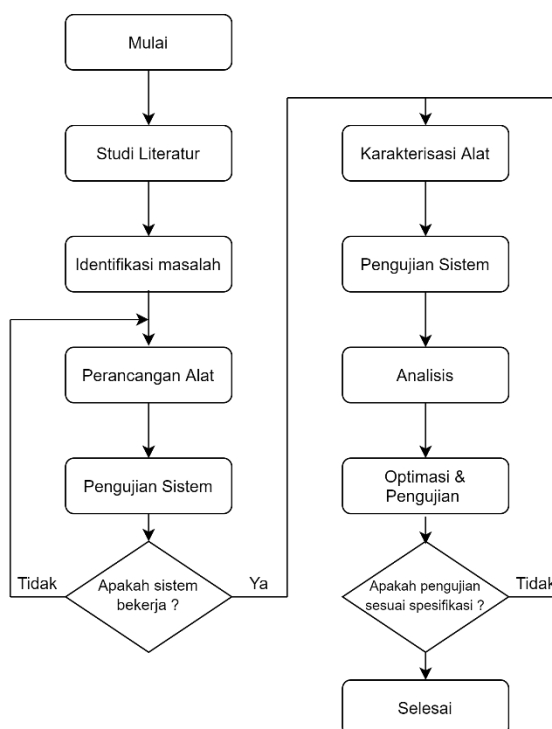
Makalah ini menguraikan tentang purwarupa pemanen energi dari tekanan kaki di atas lantai menggunakan deretan piezoelektrik tipe PZT dan modul LTC358. Purwarupa yang dibuat sangat bermanfaat karena dapat dipasang di setiap lantai rumah dan dengan sendirinya dapat digunakan sebagai sumber energi listrik untuk rumah tersebut. Purwarupa pemanen energi yang diambil dari gerakan kaki di lantai telah dikembangkan oleh Jintanawan *et al.* (2020) dengan menggunakan teknik elektromagnetik rotasional dalam mengkonversi energi langkah kaki menjadi energi listrik. Sementara itu, penelitian yang diuraikan dalam makalah ini menggunakan deretan piezoelektrik di lantai kemudian dihubungkan dengan modul pemanen energi tipe tertentu sebelum disimpan dalam penyimpanan energi.

Makalah disusun dengan urutan dan pembahasan spesifik. Bagian 1 menguraikan latar belakang dan beberapa penelitian terdahulu yang telah dilakukan terkait dengan pemanfaatan piezoelektrik sebagai sumber energi listrik. Selanjutnya, Bagian 2 memuat metode penelitian yang dilakukan dengan uraian tentang diagram skematik, *flowchart*, dan bentuk purwarupa yang dibangun. Sementara itu, hasil dan pembahasan diberikan di bagian 3 yang menguraikan uji coba skala laboratorium dan analisis terhadap data yang diperoleh. Makalah ditutup dengan kesimpulan yang memuat hasil utama yang diperoleh dari pengujian sistem serta rekomendasi penelitian berikutnya untuk menyempurnakan hasil-hasil yang telah didapatkan dalam penelitian.

## 2. Metode

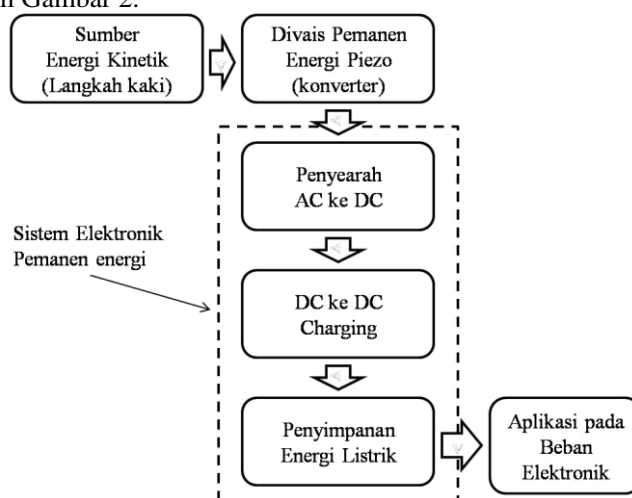
Metode penelitian yang dilakukan diberikan dalam bentuk diagram alir seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Dalam Gambar 1, langkah-langkah penelitian mencakup studi literatur, identifikasi masalah, perancangan alat, perancangan sistem, karakterisasi alat, pengujian sistem, analisis, dan optimisasi serta pengujian. Di tahap awal, studi literatur dilakukan untuk mencari dan mempelajari beberapa referensi tentang konsep *energy harvesting* menggunakan material piezoelektrik dan penelitian terdahulu yang telah dilakukan dalam pengembangan bahan tersebut sebagai sumber energi listrik. Selanjutnya, identifikasi masalah bertujuan untuk mengenal dan memahami permasalahan dalam memanen energi menggunakan langkah manusia di atas lantai. Permasalahan yang muncul dari perancangan sistem pemanen energi ini meliputi susunan perangkat piezoelektrik yang dipasang pada lantai, menentukan formasi susunan seri atau paralel maupun gabungan kedua formasi tersebut agar menghasilkan daya yang besar, dan menentukan berapa jumlah piezoelektrik yang baik yang dapat menghasilkan energi yang optimum dalam satu lantai.

Di tahap perancangan alat dan sistem dilakukan perancangan formasi perangkat yang optimum dan efisien untuk memecahkan permasalahan yang diperoleh dalam identifikasi masalah. Jika hasil pengukuran besaran listrik tegangan dan arus dalam perancangan ini dapat diperoleh, maka langkah berikutnya berupa karakterisasi dari alat yang dirancang. Dalam karakterisasi alat, pengukuran dan pengujian perangkat piezoelektrik dilakukan dalam kondisi persatuan sel maupun ketika dirangkai secara seri, paralel, atau gabungan kedua formasi seri dan paralel. Pengujian dilakukan untuk memperoleh tegangan yang dihasilkan dari formasi-formasi tersebut. Selanjutnya, analisis dilakukan untuk membandingkan hasil yang diperoleh secara eksperimental dengan teori atau konsep yang ada. Langkah terakhir optimasi dimaksudkan untuk mencari nilai optimum yang sesuai dengan yang diharapkan atau dirancang. Kegiatan-kegiatan yang meliputi langkah ini adalah pengujian secara fisik dari hasil fabrikasi dibandingkan dengan hasil pemodelan perangkat. Pemodelan dilakukan dengan mengasumsikan satu sel piezoelektrik agar memiliki tegangan maksimum dan arus minimum.



Gambar 1. Diagram Alir Metoda Penelitian yang Dilakukan

Diagram skematik dan alur transmisi energi dari purwarupa *energy harvesting* yang dibangun dalam penelitian ini diberikan dalam Gambar 2.

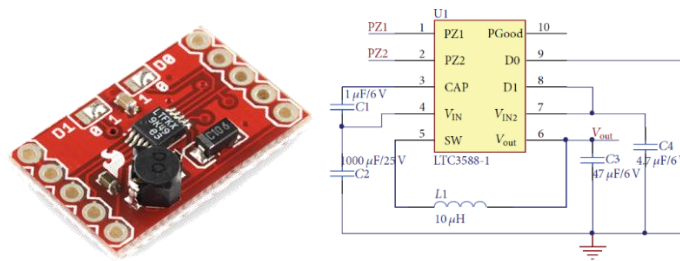


Gambar 2. Diagram Skematik Purwarupa *Energy Harvesting*

Sistem yang dikembangkan ini menggunakan sensor piezoelektrik dan memanfaatkan energi kinetik dari hentakan langkah kaki saat berjalan. Saat piezoelektrik menerima energi kinetik, piezoelektrik menghasilkan tegangan AC. Piezoelektrik memiliki kemampuan untuk mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Sifat dari piezoelektrik apabila diberikan gaya atau tekanan di atasnya maka akan menghasilkan beda potensial antara kedua sisi permukaan bahan tersebut. Purwarupa yang dibuat dilengkapi dengan sistem penyearah untuk mengubah tegangan AC menjadi DC. Tegangan yang dihasilkan dapat disimpan dalam baterai dengan sistem *charging*. Tegangan yang telah terkumpul pada baterai, bisa digunakan untuk memberikan energi listrik kepada beban, seperti untuk menyalakan lampu.

Dalam sistem pemanen energi, rangkaian pemanen energi merupakan bagian yang sangat penting (Chen *et al.*, 2014). Kinerjanya mempengaruhi secara langsung terhadap efisiensi konversi energi yang dihasilkan. Dalam purwarupa ini, rangkaian pemanen energinya menggunakan LTC3588 yang didalamnya merupakan integrasi antara penyearah gelombang penuh dan *buck converter* berefisiensi tinggi. Gambar 3 memperlihatkan keping LTC3588 dan rangkaian lengkapnya.





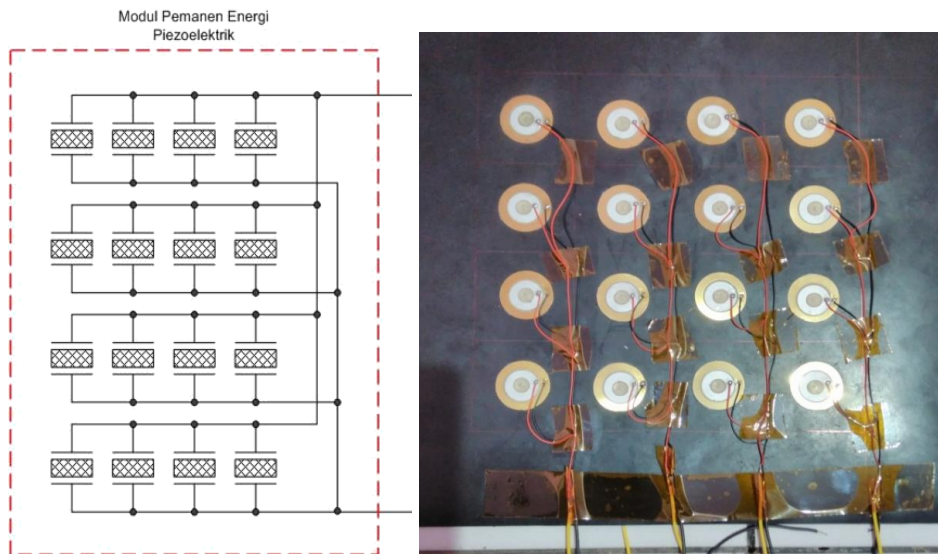
Gambar 3. Keping LTC3588 dan Rangkaian Lengkapnya (Chen *et al.*, 2014)

Komponen lainnya yang juga digunakan dalam purwarupa adalah modul *step up booster*. Modul tersebut berfungsi sebagai pengali atau peningkat tegangan DC. Cara kerja modul ini adalah bila ada tegangan kecil yang masuk, maka modul ini dapat disesuaikan tegangan keluarannya. Jika tegangan keluaran akan digunakan untuk menyalakan lampu DC 12 V, maka modul akan di *setting* 12 V, sehingga jika input yang masuk 2 V akan dapat menyalakan lampu tersebut. Modul ini merupakan modul penaik tegangan dari input 2-24 V menjadi output 5 sampai 28 V DC, menghasilkan arus output maksimum 2 A, dan berdimensi 37×17×6 mm<sup>3</sup>. Modul yang digunakan bertipe MT 3608 dan bentuknya diberikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Modul *Step Up Booster* MT 3608

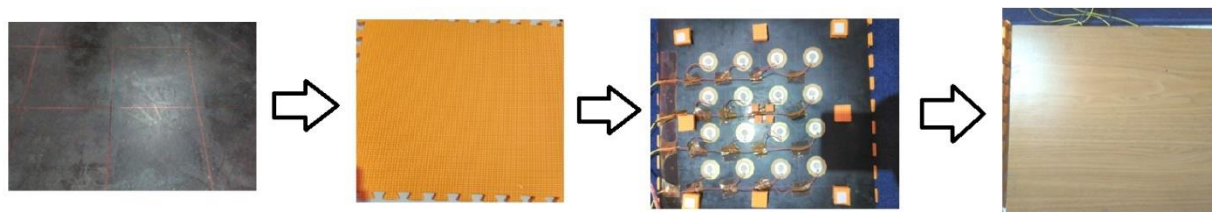
Sementara itu, bentuk skematik dari susunan piezoelektrik yang digunakan dan pemasangannya di lantai diberikan dalam Gambar 5. Dalam purwarupa ini, enam belas keping piezoelektrik dirangkai sedemikian rupa pada lapisan karet tipis ukuran 30 cm × 30 cm dengan jarak yang sama antar keping piezoelektrik dalam karet tersebut.



Gambar 5. Bentuk Skematik Deretan Piezoelektrik dan Pemasangan Di Lantai

Lapisan karet tersebut dipasang pada lantai busa karet, kemudian direkatkan menggunakan *double tip* agar ketika lantai piezoelektrik diinjak tidak bergeser. Untuk menyangga alat yang dibuat, dipasang bantalan berukuran 2

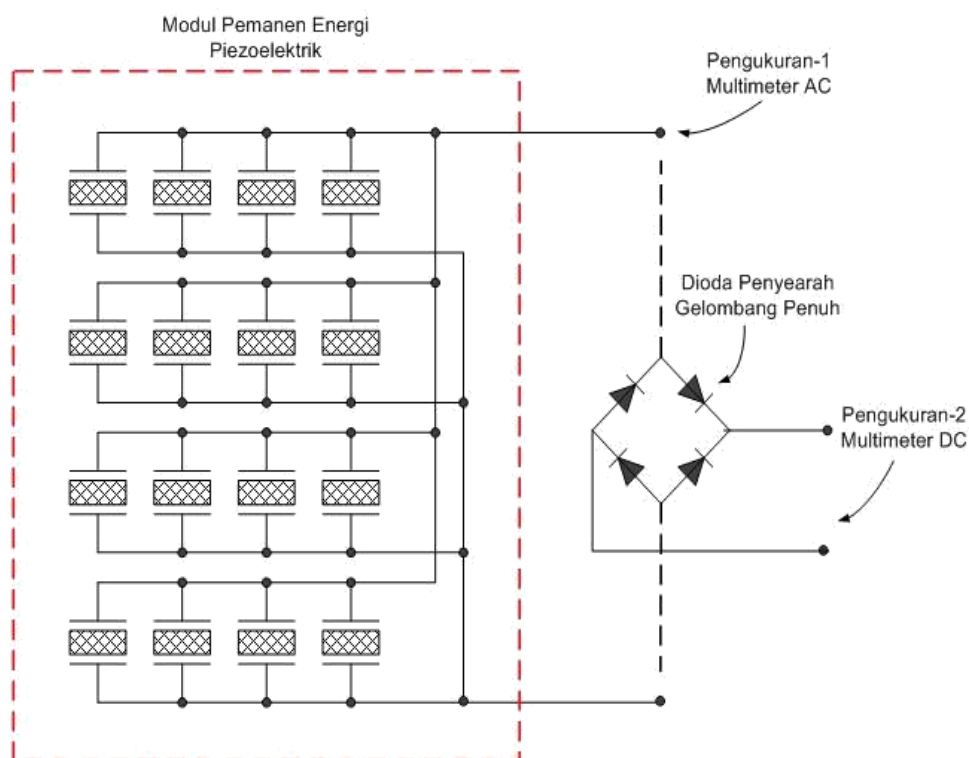
cm × 2 cm pada sisi piezoelektrik. Langkah terakhir adalah pemasangan sebuah papan sebagai tempat pijakan. Urutan proses merealisasikan pemasangan deretan piezoelektrik dalam lantai diberikan dalam Gambar 6.



Gambar 6. Proses Pemasangan Deretan Piezoelektrik Dalam Lantai

### 3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian tahap awal bertujuan untuk mengetahui tegangan dan arus yang dihasilkan dari modul pemanen energi piezoelektrik yang difabrikasi. Pengujian meliputi pengukuran arus dan tegangan pemanen energi secara langsung dan melalui penyearah *diode bridge* menggunakan multimeter AC dan DC. Pengukuran dilakukan mengikuti skema yang diberikan dalam Gambar 7. Hasil pengukuran tegangan dan arus efektif yang ditandai dengan pengukuran-1 dalam Gambar 6 dan pengukuran tegangan dan arus DC keluaran dari penyearah jembatan yang ditandai dengan pengukuran-2 pada Gambar 7 diberikan pada Tabel 1.



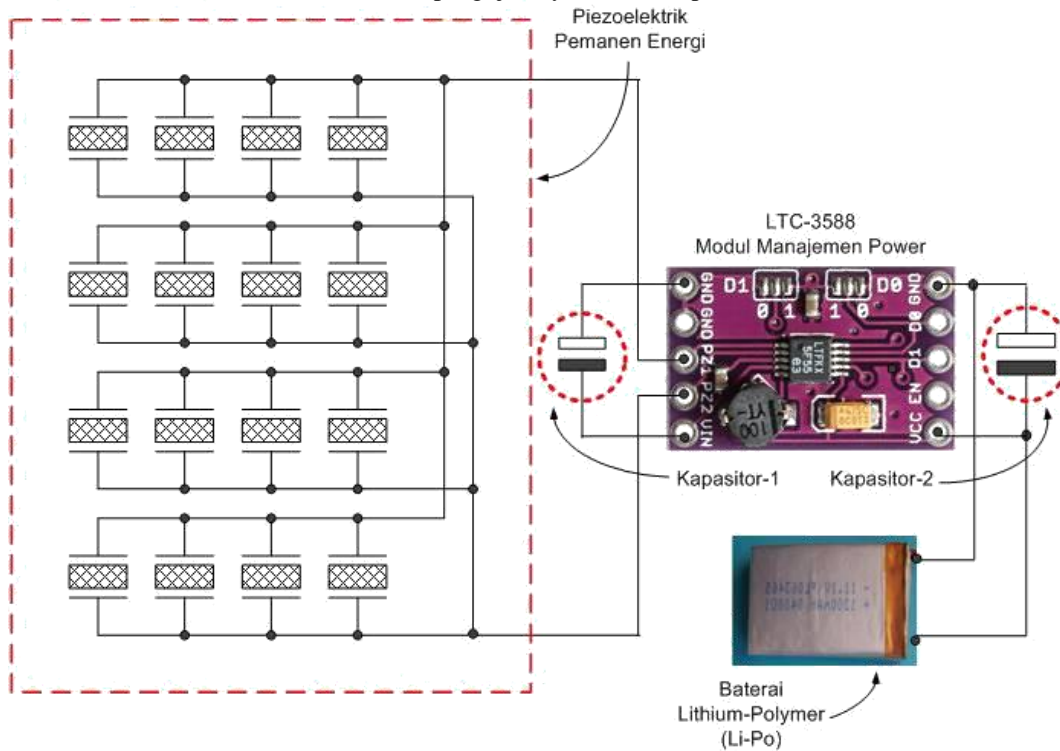
Gambar 7. Skema Pengukuran Tegangan dan Arus yang dihasilkan Deretan Piezoelektrik

Tabel 1. Nilai Tegangan dan Arus AC Efektif yang dihasilkan Piezoelektrik dalam Lima Kali Percobaan Injakan Kaki

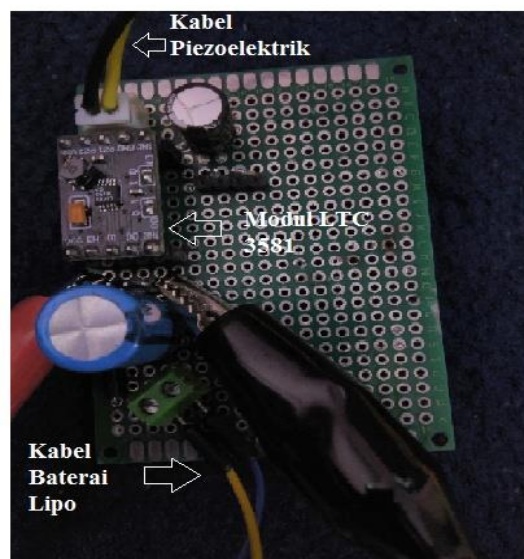
Eksperimen	Pengukuran-1			Pengukuran-2		
	Tegangan efektif (V)	Arus efektif (mA)	Daya aktif (W)	Tegangan DC (V)	Arus DC (mA)	Daya (W)
1	8	50	0,40	10	15	0,15
2	5	25	0,12	15	30	0,45
3	10	70	0,70	24	70	1,68
4	20	125	2,50	30	116	3,48
5	15	90	1,35	28	90	2,52

Hasil karakterisasi dari pemanen energi piezoelektrik ini diperoleh tegangan efektif maksimum mencapai 20 Volt dan arus 125 mA, sehingga diperoleh daya aktif maksimum sebesar 2,5 W untuk pengujian tanpa penyearah. Sedangkan, hasil uji yang diperoleh dengan menggunakan penyearah dioda adalah mencapai 30 V dan arus 116 mA, sehingga daya maksimumnya sebesar 3,48 W. Pada pengujian ini dapat dilihat bahwa tegangan dan arus yang dihasilkan lebih besar pada piezoelektrik yang dipasangkan dioda (DC).

Pengujian berikutnya dilakukan untuk memperoleh data tentang durasi pengisian baterai sebagai penyimpan energi listrik dengan skema rangkaian diperlihatkan pada Gambar 8. Rangkaian tersebut menggunakan kapasitor 2200  $\mu\text{F}/16\text{ V}$  dan 220  $\mu\text{F}/25\text{ V}$  karena kapasitor ini memiliki waktu pengisian dan pengosongan muatan lebih lama. Hal tersebut diamati saat pengujian terhadap lampu LED kecil. Pengujian ini memasang piezoelektrik dengan kapasitor 220  $\mu\text{F}/25\text{ V}$  pada kaki V masukan dan *ground* LTC. Sementara kapasitor 2200  $\mu\text{F}/16\text{ V}$  dipasang pada kaki Vcc dan *ground* kaki LTC, kemudian dihubungkan ke dioda dan ke baterai seperti diperlihatkan pada Gambar 8 dan realisasinya diberikan dalam Gambar 9. Sementara itu, hasil pengujiannya diberikan pada Tabel 2.



Gambar 8. Rangkaian Pengisian Baterai Li-Po



Gambar 9. Perangkat Keras Pengisian Baterai Li-Po

Tabel 2. Hasil Pengujian Menggunakan Kapasitor 220  $\mu$ F/25 V dan Kapasitor 2200  $\mu$ F/16 V

No.	Baterai	Langkah	Tegangan awal (V)	Tegangan akhir (V)	Jumlah tegangan yang naik (V)	Waktu
1.	Li-Po 250 mAH	500	1,355	1,508	0,153	5 menit 26 detik
2.	Li-Po 150 mAH	500	2,541	2,547	0,006	5 menit 12 detik

Pengujian terhadap proses *charging* pada baterai Li-Po 250 mAH menunjukkan tegangan naik 153 mV selama 5 menit 26 detik, sedangkan untuk baterai Li-Po 150 mAH tegangannya naik 6 mV selama 5 menit 12 detik. Dengan asumsi kenaikan tegangan linier terhadap waktu, lama waktu yang diperlukan ( $t$ ) untuk menaikkan tegangan sebesar 1 V pada baterai Li-Po 250 mAH dapat ditentukan dengan perbandingan mengikuti persamaan (1).

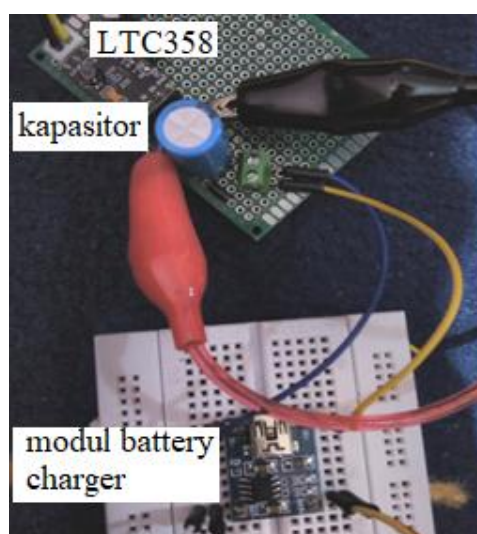
$$\frac{0,153 \text{ V}}{5 \text{ menit } 26 \text{ detik}} = \frac{1 \text{ V}}{t} \quad (1)$$

Berdasarkan persamaan (1), waktu yang diperlukan untuk menaikkan tegangan sebesar 1 V tersebut sebesar 35 menit 51 detik. Sementara itu, durasi waktu ( $t$ ) untuk mengisi baterai 150 mAH sebesar 1 V dihitung dengan perbandingan mengikuti persamaan (2).

$$\frac{0,006 \text{ V}}{5 \text{ menit } 12 \text{ detik}} = \frac{1 \text{ V}}{t} \quad (2)$$

Dengan menyelesaikan persamaan (2), durasi waktu ( $t$ ) sebesar 14 jam 44 menit. Dengan demikian, pengisian baterai Li-Po 250 mAH lebih cepat dibandingkan dengan Li-Po 150 mAH. Namun bila lantai piezo tidak diinjak, maka akan turun terus menerus. Pada baterai Li-Po 150 mAH pengisian lebih lambat. Namun bila lantai piezo tidak diinjak, maka muatan baterai tidak akan turun tetapi bertambah, karena adanya muatan pada kapasitor yang masih menyuplai muatan ke baterai.

Pengujian berikutnya memasang piezoelektrik dengan kapasitor 220  $\mu$ F/25 V pada kaki Vin dan *ground* LTC. Sementara kapasitor 2200  $\mu$ F/16 V dipasang pada kaki Vcc dan *ground* kaki LTC, kemudian dihubungkan ke dioda dan modul *battery charger* agar pengisian ke baterai lebih cepat. Gambar 10 memperlihatkan instalasi pengujian pengisian baterai dengan kapasitor 2200  $\mu$ F/16 V, 220  $\mu$ F/25 V dan modul *charging*. Tabel 3 menunjukkan hasil pengisian baterai menggunakan modul *charging*.



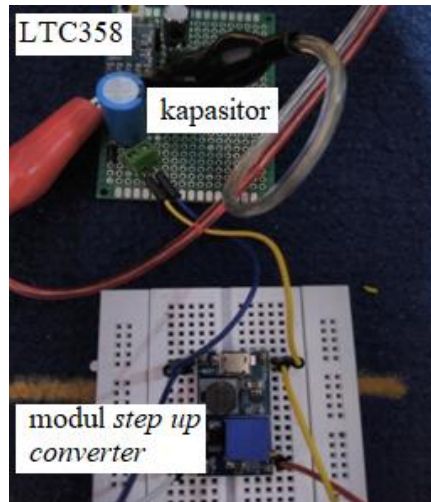
Gambar 10. Instalasi-Pengujian Pengisian Baterai dengan Modul *Battery Charger*

Tabel 3. Hasil Pengisian Baterai Menggunakan Modul *Charging*

No.	Baterai	Langkah	Tegangan Awal (V)	Tegangan Akhir (V)	Waktu
1.	Li-Po 150 mAH	500	2,540	2,541	6 menit 16 detik
2.	Li-Po 250 mAH	500	1,301	1,297	5 menit 7 detik

Hasil pengujian memperlihatkan penggunaan modul *charging* pada pengisian baterai 150 mAH menjadi sangat lambat. Pada baterai 250 mAH terjadi penurunan dan tidak ada perubahan dalam kenaikan muatan baterai.

Pengujian lainnya adalah memasang piezoelektrik dengan kapasitor 220  $\mu$ F/25 V pada kaki Vin dan *ground* LTC. Sementara kapasitor 2200  $\mu$ F/16 V dipasang pada kaki Vcc dan *ground* kaki LTC, kemudian dihubungkan ke dioda dan modul *step up converter* agar pengisian muatan ke baterai lebih cepat dibanding menggunakan modul *charging* seperti ditunjukkan pada Gambar 11. Hasil pengujiannya ditunjukkan pada Tabel 4.



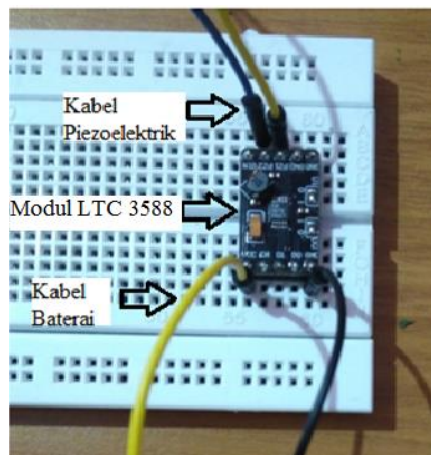
Gambar 11. Instalasi Pengujian Pengisian Baterai dengan Modul *Step Up Converter*

Tabel 4. Hasil Pengujian Piezoelektrik dengan Kapasitor 220  $\mu$ F/25 V

No.	Baterai	Langkah	Tegangan Awal (V)	Tegangan Akhir (V)	Waktu
1.	Li-Po 150 mAH	500	2,517	2,522	5 menit 20 detik
2.	Li-Po 250 mAH	500	1,302	1,268	5 menit 7 detik

Dari hasil yang didapat baterai 150 mAH terdapat kenaikan muatan sebesar 5 mV pada 500 langkah selama 5 menit 20 detik, tetapi ketika lantai piezo tidak diinjak, muatan pada baterai menurun sedikit demi sedikit. Hal ini disebabkan tidak terjadinya proses konversi energi saat lantai dengan bahan piezoelektrik tidak diinjak. Sementara pada baterai 250 mAH tidak terjadi kenaikan dan terjadi penurunan pada baterai karena kapasitasnya relatif besar sehingga masih mampu menyimpan energi listrik meskipun tidak terjadi proses pengisian.

Pengujian selanjutnya menggunakan piezoelektrik, modul LTC358-1 dan baterai tanpa kapasitor. Kabel piezoelektrik ini dipasang pada kaki PZ1 dan PZ2 pada modul LTC. Kemudian baterai dipasang ke kaki VCC dan *ground* pada modul LTC. Rangkaian diperlihatkan pada Gambar 12 dan hasil pengujiannya diberikan pada Tabel 5.



Gambar 12. Instalasi Pengujian dengan Modul LTC tanpa Kapasitor

Tabel 5. Hasil Pengisian Tegangan Baterai Menggunakan Modul LTC tanpa Menggunakan Kapasitor

No.	Baterai	Langkah	Tegangan awal (V)	Tegangan akhir (V)	Waktu
1.	Lion 2200 mAH	500	2,627	2,630	5 menit
2.	Li-Po 150 mAH	500	2,514	2,524	5 menit
3.	Li-Po 250 mAH	500	1,089	1,188	5 menit

Dari hasil pengujian untuk baterai Lion 220 mAH lama dalam pengisiannya, dikarenakan memiliki arus yang besar. Arus yang besar tersebut mengakibatkan pengisian menjadi lama, karena arus yang dihasilkan piezoelektrik 0-116  $\mu$ A, sehingga tidak mampu mengisi baterai dengan cepat. Jika lantai piezoelektrik tidak diinjak, maka muatan tidak turun. Pada pengisian baterai Li-Po 150 mAH mampu mengisi baterai 10mV dalam waktu 5 menit. Jika lantai

piezoelektrik tidak diinjak, muatan baterai tidak berubah menjadi turun. Sementara baterai Li-Po 250 mAH mengalami penurunan muatan drastis ketika lantai piezoelektrik tidak diinjak. Durasi waktu ( $t$ ) untuk mengisi muatan baterai 150 mAH sebanyak 1 V ditentukan dengan persamaan (3).

$$\frac{0,010 \text{ V}}{5 \text{ menit}} = \frac{1 \text{ V}}{t} \quad (3)$$

Berdasarkan persamaan (3), nilai  $t$  adalah 8 jam 33 menit. Dengan demikian, untuk mengisi baterai Li-Po 150 mAH sebanyak 1 V diperlukan waktu 8 jam 33 menit.

Pengujian berikutnya menggunakan piezoelektrik, modul LTC358-1, baterai, serta diinjak oleh orang dengan berat badan bervariasi. Kabel piezoelektrik ini dipasang pada kaki PZ1 dan PZ2 pada modul LTC, kemudian baterai dipasang ke kaki VCC dan GND pada modul LTC. Rangkaian dapat dilihat pada Gambar 13 dan tabel pengujiannya diberikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Pengisian Tegangan Baterai Li-Po 150 mAH berdasarkan berat badan

No.	Berat badan (kg)	Langkah	Tegangan awal (V)	Tegangan akhir (V)	Waktu	Kenaikan tegangan baterai (mV)
1.	73 kg	500	2,514	2,524	5 menit 20 detik	10
2.	56 kg	500	2,883	2,891	3 menit 50 detik	8
3.	43 kg	500	2,894	2,900	4 menit 50 detik	6
4.	57 kg	500	2,902	2,910	4 menit 53 detik	8

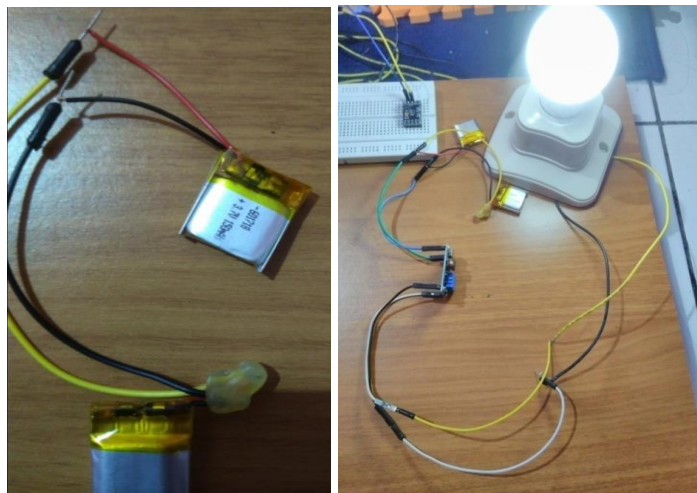
Dari hasil pengujian ini dapat dilihat bahwa naiknya muatan baterai dipengaruhi oleh bobot badan yang menginjaknya. Naiknya tegangan pada baterai juga dapat dipengaruhi dari tekanan yang diberikan terhadap piezoelektrik. Jika tekanan yang diterima besar maka muatan yang terisi pada baterai juga besar.

Pengujian berikutnya dilakukan untuk menyalakan lampu menggunakan baterai Li-Po 150 mAH dan modul *step up* MT3608. Agar lampu dapat menyala, maka modul *step up* disetting pada keluarannya untuk 12 V. Kabel positif baterai dihubungkan dengan kaki V+ kaki modul *step up* MT3608 dan kaki negatif baterai dihubungkan dengan kaki V- kaki modul *step up* MT3608. Sementara, kabel positif lampu dihubungkan dengan kaki *out+* kaki modul *step up* MT3608 dan kabel negatif lampu dihubungkan dengan kaki *out-* kaki modul *step up* MT3608. Pengujian purwarupa *energy harvesting* dengan beban Lampu DC 12 V/3 W diberikan pada Gambar 13.



Gambar 13. Pengujian Purwarupa *Energy Harvesting* dengan Beban Lampu DC 12 V/3 W

Saat menggunakan satu baterai untuk menyalakan lampu, lampu tersebut tidak menyala karena arus baterai tersebut kecil. Untuk mengatasinya, 2 buah baterai Li-Po 150 mAH diparalel agar diperoleh arus yang cukup besar untuk menyalakan sebuah lampu DC 12 V/3 W. Pengujian purwarupa *energy harvesting* paralel dengan Baterai Li-Po 150 mAH dengan beban lampu diberikan pada Gambar 14 sebelah kiri, sedangkan rangkaian pengujiannya diberikan pada Gambar 14 sebelah kanan.



Gambar 14. Pengujian Purwarupa *Energy Harvesting* Paralel dengan Baterai Li-Po 150 mAH dengan Beban Lampu

### Kesimpulan

Makalah ini menguraikan tentang rancang bangun purwarupa sistem pemanen energi menggunakan piezoelektrik yang dipasang di lantai dan menghasilkan energi listrik saat mendapat tekanan. Purwarupa sistem tersusun dari deretan 16 piezoelektrik yang dibuat menjadi 4 baris dan dipasang secara paralel. Sistem dilengkapi dengan modul pemanen energi LTC358 dan modul *step up booster* MT 3608. Hasil pengujian menunjukkan saat deretan piezoelektrik diinjak dengan jumlah dan durasi tertentu maka energi listrik berhasil disimpan dalam baterai. Daya maksimum yang dihasilkan sebesar 3,48 W setelah dilewatkan melalui penyearah gelombang penuh. Besar kenaikan tegangan listrik yang tersimpan dalam baterai bervariasi sesuai dengan tipe dan kapasitas baterainya. Untuk jumlah injakan kaki yang sama terhadap deretan piezoelektrik, kenaikan pengisian tegangan baterai Li-Po 150 mAH lebih kecil dibandingkan dengan tipe 250 mAH. Kontribusi dari penelitian yang telah dilakukan berupa konfigurasi pemanen energi berupa deretan 16 piezoelektrik yang dilengkapi dengan modul pemanen energi LTC358 dan modul *step up booster* MT3608 untuk menghasilkan energi listrik yang memadai untuk menyalakan beban listrik berupa lampu. Purwarupa ini perlu dikembangkan lebih lanjut agar dapat menghasilkan energi listrik yang memadai untuk menyalakan beban listrik dengan jumlah lebih banyak dan kualitas daya lebih baik. Penelitian berikutnya yang dapat dilakukan mencakup penentuan skema efektif deretan piezoelektrik, pemilihan tipe piezoelektrik yang lebih tepat sesuai dengan spesifikasi beban yang digunakan, penambahan pelindung piezoelektrik dari kerusakan karena injakan, dan desain rangkaian penyearah yang dikombinasikan dengan filter agar diperoleh kualitas daya yang lebih baik.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Jenderal Achmad Yani atas dukungan finansial dalam menyelesaikan penelitian ini. Penelitian ini dibiayai dari skema Penelitian Kompetitif Unjani Tahun Anggaran 2020.

### Daftar Pustaka

- Afif, M. & Rini, N. P. (2017). Rancang Bangun Instalasi Lampu PJU Termodifikasi LDR Berbasis Material Piezoelektrik pada Polisi Tidur. *Jurnal Fisika FLUX*, 14(2), 85-89.
- Akinaga, H. (2020). Recent advances and future prospects in energy harvesting technologies. *Japanese Journal of Applied Physics* 59, 110201.
- Büyükköskün, İ., Tekin, S. A., Gürel, S. & Genç, M. S. (2019). Electricity Production from Wind Energy By Piezoelectric Material. *Int. Journal of Renewable Energy Development*, 8 (1), 41-46.
- Chen, L., Xu, X., Zeng, P. & Ma, J. (2014). Integration of Energy Harvester for Self-Powered Wireless Sensor Network Nodes. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Volume 2014, Article ID 782710.
- Eghbali, P., Younesian, D., Moayedizadeh, A. & Ranjbar, M. (2020). Study in circular auxetic structures for efficiency enhancement in piezoelectric vibration energy harvesting, *Sci Rep* 10, 16338 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73425-1>
- Jintanawan, T., Phanomchoeng, G., Suwankawin, S., Kreepoke, P., Chetchatree, P. & U-viengchai, C. (2020). Design of Kinetic-Energy Harvesting Floors. *Journal of Energies* 13, 5419.
- Najmurokhman, A., Fakhri, Z. & Reza, M. (2017). Pengembangan Pembangkit Listrik Tersebar Energi Baru Terbarukan dan Konversi Energi. *Seminar Nasional Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Negeri Gorontalo, 18 Oktober 2017*.

- Nechibvute, A., Chawanda, A. & Luhanga, P. (2012). Piezoelectric Energy Harvesting Devices: An Alternative Energy Source for Wireless Sensors. *Journal of Smart Materials Research*, Volume 2012, 853481.
- Niasar, E.H.A., Dahmardeh, M. & Googarchin, H. S. (2020). Roadway piezoelectric energy harvester design considering electrical and mechanical performances. *J Mechanical Engineering Science*, 234(1), 32–48.
- Pratama, R. R., Sofyan, M. F. & Ekawati, E. (2015). Desain Sepatu Berpiezoelektrik Sebagai Sistem Pemanen Energi dari Aktivitas Berjalan Manusia. Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi (SNIKO) 2015, Bandung 10-11 Desember 2015.
- Varadha, E. & Rajakumar, S. (2018). Performance improvement of piezoelectric materials in energy harvesting in recent days – a review. *Journal of Vibroengineering*, 20 (7), 2632-2650.
- Wang, D.W., Liu, M.X., Qian, W.J., Wu, X., Ma, Q. & Wu, Z.Q. (2020). Parametrical Investigation of Piezoelectric Energy Harvesting via Friction-Induced Vibration. *Journal of Shock and Vibration*, Volume 2020, 6190215.
- Xu, X., Cao, D., Yang, H. & He, M. (2018). Application of piezoelectric transducer in energy harvesting in pavement, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11 (2018). 388–395.
- Yuliana, H., Yusaniar, R., Zainal, Y. B. (2020). Rancang Bangun Sistem Energy Harvesting di Ruang Bising Menggunakan Piezoelektrik Array. *Jurnal Teknik*, 19(1), 69-78.
- Zebua, D., Kolago, D., Wijaya, Y.A.C. & Utama, Y. A. K. (2019). Desain dan Pembuatan Pembangkit Listrik Tenaga Air Hujan Menggunakan Piezoelectric Disk, *TECNOSCIENZA*, 4(1), 80-94.



## Performance Investigation of Cooling Machine Practice Props After Retrofitted by Natural Refrigerants

Mutaufiq<sup>1</sup>, Hendri Sulisty<sup>2</sup>, Kamin Sumardi<sup>3</sup>, Ega Taqwali Berman<sup>4</sup>, dan Apri Wiyono<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Departemen Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Pendidikan Teknologi dan Kejuruan, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

<sup>1</sup>[taufiq\\_top@upi.edu](mailto:taufiq_top@upi.edu), <sup>2</sup>[hendri\\_sulistyo@upi.edu](mailto:hendri_sulistyo@upi.edu), <sup>3</sup>[kaminsumardi@upi.edu](mailto:kaminsumardi@upi.edu), <sup>4</sup>[egatb@upi.edu](mailto:egatb@upi.edu), <sup>5</sup>[apri.wiyono@upi.edu](mailto:apri.wiyono@upi.edu)

### Abstrak

Penyesuaian komponen utama mesin pendingin perlu dilakukan setelah di-*retrofit*/diganti dengan refrigeran baru yang ramah lingkungan. Ini dilakukan untuk mendapatkan kinerja mesin pendingin yang baik. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh penyesuaian komponen utama mesin pendingin dalam meningkatkan kinerja mesin pendingin setelah menggunakan refrigeran baru yang ramah lingkungan. Penelitian dirancang secara eksperimen pada mesin pendingin jenis refrigerator yang menggunakan refrigeran R-134a sebagai fluida kerja. Jenis refrigeran hidrokarbon yang digunakan untuk menyubstitusi R-134a adalah Musicool-22 (MC-22). Beban pendinginan dalam kabin evaporator adalah larutan garam. Pengujian dilakukan dalam dua tahap. Pada tahap pertama refrigerator beroperasi dengan kondisi asalnya (R-134a dan CT1/variasi 1) dan pada tahap kedua fluida kerja R-134a di-*retrofit* dengan MC-22 dengan penyesuaian komponen utamanya. Selanjutnya kinerja refrigerator dianalisis menggunakan *software CoolPack 1.5* dengan membandingkan nilai *Refrigerating Effect* (RE), kalor kerja kompresor, dan angka kinerja (COP) refrigerator sebelum di-*retrofit* dan setelah di-*retrofit*. Hasil analisis menunjukkan bahwa angka kinerja refrigerator terbaik adalah saat refrigerator beroperasi dengan variasi 3 (refrigeran MC-22, alat ekspansi CT2) dengan kenaikan nilai COP berkisar 0,62% sampai 2,12% dari kondisi asalnya.

Kata kunci: hidrokarbon, kinerja, refrigerator, *resizing*, *retrofit*.

### Abstract

Resizing the main components of the cooling machine needs to be done after being retrofitted with a new refrigerant. This is done to improve the performance of the cooling engine. In this study, we would like to investigate the effect of adjusting the main components of the cooling machine performance after using new environmentally friendly refrigerants. The experiment was designed on a refrigerator that uses R-134a as a working fluid. The type of hydrocarbon refrigerant used to substitute R-134a is Musicool-22 (MC-22). The cooling load in the evaporator cabin is a salt solution. Testing is done in two stages. In the first stage, the refrigerator operates in its original condition (R-134a with CT1 as the expansion valve). In the second stage, the working fluid R-134a is retrofitted with MC-22 with adjustments to its main components into several variations. Furthermore, the refrigerator performance is measured by comparing the value of the refrigerating effect (RE), the heat of compression, and the refrigerator performance (COP). The test results show that the best refrigerator performance rate is when the refrigerator operates with variation 3 (refrigerant MC-22 with CT2 as the expansion valve), increasing COP values ranging from 0.62% to 2.12%.

Keywords: hydrocarbons, performance, refrigerators, *resizing*, *retrofit*

### 1. Pendahuluan

Mesin pendingin jenis refrigerator merupakan alat yang banyak digunakan di rumah tangga sebagai alat untuk menyimpan makanan agar tetap segar dan lebih awet (Wang & Yu, 2015; Sari & Balli, 2014). Mesin pendingin refrigerator komersial, menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap dengan empat komponen utamanya. Komponen-komponen tersebut terdiri dari kompresor untuk menyirkulasikan refrigeran, *condenser* untuk mengondensasikan refrigeran dengan melepas kalor ke lingkungan, alat ekspansi untuk menurunkan tekanan refrigeran, dan evaporator sebagai komponen yang menyerap kalor dari produk yang didinginkan. Keempat komponen utama ini dihubungkan dengan pipa tembaga yang di dalamnya mengalir refrigeran R-134a sebagai fluida kerja. Hanya saja, refrigeran R-134a yang digunakan oleh refrigerator, termasuk grup HFC yang memiliki nilai GWP (*Global Warming Potential*) tinggi sehingga penggunaannya dibatasi oleh *Kyoto protocol* (Harby, 2017; Yu & Teng, 2014). Karena dapat mengakibatkan pemanasan global di permukaan bumi dan dapat berdampak negatif terhadap makhluk hidup. Untuk itu dibutuhkan refrigeran dengan nilai GWP rendah dan nilai ODP (*Ozone Depletion Potential*) nol (UNEP, 2015; Kanna, 2018).

#### Info Makalah:

Dikirim : 08-18-21;

Revisi 1 : 08-23-21;

Revisi 2 : 10-11-21;

Diterima : 10-25-21.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +6281320324587

e-mail : [taufiq\\_top@upi.edu](mailto:taufiq_top@upi.edu)

Untuk menyikapi fakta di atas, banyak percobaan penggantian refrigeran dilakukan menggunakan hidrokarbon pada mesin pendingin (Jatinder et al., 2019; Fatouh & Abou-Ziyan, 2018; Hossain et al., 2019). Walaupun refrigeran hidrokarbon bersifat mudah terbakar, akan tetapi hidrokarbon memiliki nilai ODP nol dan nilai GWP yang rendah sehingga ramah terhadap lingkungan. Untuk itu pada tahun 2019, laboratorium Refrigerasi Universitas Pendidikan Indonesia, telah melakukan

investigasi penggantian refrigeran R-134a untuk mendapatkan refrigeran baru untuk alat praktik mesin pendingin refrigerator dengan metode substitusi langsung, sebagaimana dilakukan oleh peneliti-peneliti lain (Aprea, Greco, & Maiorino, 2016; Mohanraj, 2019; Elgendy, Hassanain, & Fatouh, 2015). Hal ini dilakukan untuk menjaga kelangsungan alat peraga mesin pendingin refrigerator di laboratorium Refrigerasi sebagai alat peraga praktikum. Hasil pengujian menunjukkan bahwa, mesin pendingin refrigerator yang di *retrofit* dengan refrigeran ramah lingkungan MC-22 masih bisa beroperasi dengan baik. Pada variasi jumlah massa refrigeran MC-22 sama dengan 25% sampai 35% dari massa refrigeran R-134a, kinerja refrigerator yang ditunjukkan oleh COP (*Coefficient of Performance*), lebih baik sampai 10,3% dari pada refrigerator yang menggunakan refrigeran R-134a (Mutaufiq, Sulisty, Berman, & Wiyono, 2019).

Hasil ini mengindikasikan bahwa refrigeran R-134a yang digunakan oleh alat peraga praktik mesin pendingin refrigerator dapat digantikan oleh refrigeran MC-22 yang ramah lingkungan. Selain ramah lingkungan MC-22 dapat di substitusi secara langsung, karena oli sintetik yang ada di dalam kompresor tidak bereaksi dengan refrigeran MC-22 sehingga aman digunakan. Hal ini membuka peluang untuk meningkatkan performa refrigerator dengan melakukan resizing komponen utamanya. Karena dengan karakteristik fisik refrigeran yang berbeda, sudah selazimnya dilakukan perubahan komponen utama penyusun mesin pendingin. Untuk itu, dalam penelitian ini, dilakukan investigasi pengaruh penyesuaian komponen utama mesin pendingin refrigerator secara eksperimen dalam meningkatkan kinerja mesin setelah menggunakan refrigeran baru yang ramah lingkungan (El-Sayed, El-Morsi, & Mahmoud, 2018).

## 2. Metode

Untuk menyelidiki kinerja mesin pendingin dilakukan eksperimen pada mesin pendingin jenis refrigerator satu pintu seperti terlihat pada gambar 1 alat peraga praktik mesin pendingin refrigerator. Komponen penyusun refrigerator diantaranya yaitu kompresor jenis *hermetic* 1/6 PK fase tunggal 220V/50H, *condenser* jenis *tube fine*, *strainer*, alat ekspansi berupa pipa kapiler dengan dimensi panjang 3 m dan diameter 0,7874 mm, serta evaporator jenis *tube plate*.

Alat yang digunakan untuk penelitian di antaranya adalah refrigerator sebagai alat uji, *manifold gauge* untuk mengukur tekanan refrigeran, mesin las *oxy-ace* untuk instalasi perpipaan, *electronic charging meter* untuk menimbang massa refrigeran, *stopwatch* untuk menghitung waktu pengambilan data, tabung kosong refrigeran untuk menampung refrigeran sementara, mesin *recovery* refrigeran untuk *me-recovery* refrigeran lama, dan *digital thermometer* untuk mengukur suhu. Alat ukur *manifold gauge* digunakan untuk mengukur tekanan refrigeran di saluran *suction* (sebelum kompresor) dan tekanan refrigeran di *discharge* (setelah kompresor). Pengukuran dilakukan dengan menempatkan selang tekanan rendah pada katup servis *suction* kompresor dan selang tekanan tinggi pada katup servis *discharge*.



Gambar 1. Alat Peraga Praktik Mesin Pendingin Refrigerator

Selanjutnya bahan yang digunakan pada penelitian di antaranya yaitu refrigeran MC-22 dan R-134a sebagai fluida kerja, larutan garam sebagai beban pendinginan, empat unit pipa kapiler sebagai alat ekspansi, pipa tembaga ¼ inci sebagai penghubung komponen utama perpipaan sistem refrigerasi kompresi uap, Nitrogen untuk tes kebocoran

perpipaan refrigerator, oksigen dan *acetylene* sebagai bahan untuk pengelasan, dan *hand valve* untuk mengatur aliran refrigeran. Tabel 1 menunjukkan komposisi bahan penyusun refrigeran MC-22 yang digunakan untuk menggantikan refrigeran R-134a.

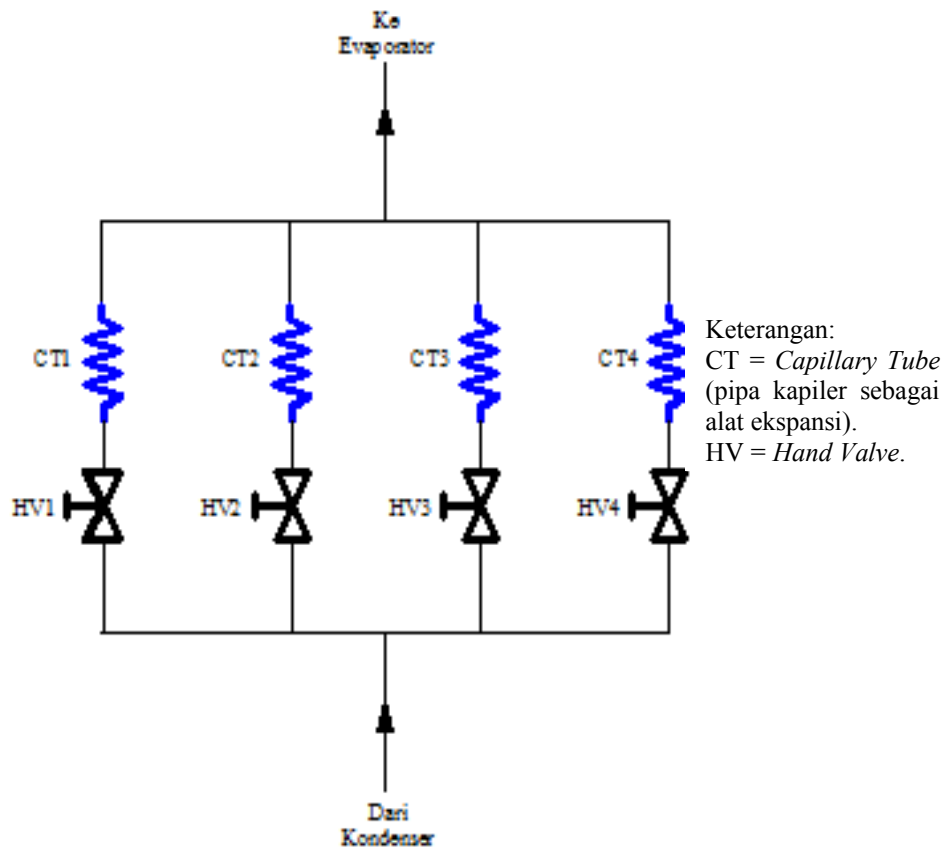
Tabel 1. Komposisi Bahan Penyusun MC-22.

Nama Kimia	Konsentrasi
<i>Etane</i>	<0,2 %w/w
<i>Propane</i>	>99,5 %w/w
<i>i-Butane</i>	<0,3 %w/w
<i>n-Butane</i>	<0,2 %w/w
<i>Pentane</i>	<100 ppm
<i>n-Heksane</i>	<50 ppm
<i>Olefin</i>	<0,03 % w/w

Sumber: *safety data sheet* Pertamina (*Safety Data Sheet MC-22*, 2017)

Pada refrigerator terdapat komponen utama yang disesuaikan untuk mendapatkan kinerja refrigerator yang lebih baik. Komponen utama refrigerator yang disesuaikan adalah alat ekspansi. Alat ekspansi pada refrigerator berupa pipa kapiler dengan panjang dan diameter tertentu. Komponen ini bertugas untuk menurunkan tekanan refrigeran cair dari tekanan *condenser* sampai tekanan evaporasi di evaporator. Sehingga refrigeran dapat menyerap kalor dari produk di dalam kabin evaporator untuk menguap dan kembali ke kompresor. Dimensi pipa kapiler pada refrigerator sudah didesain oleh pabrik pembuatnya dengan kapasitas pendinginan dan jenis refrigeran yang digunakan refrigerator. Sehingga refrigerator dapat mendinginkan produk sesuai dengan kapasitas mesin pendingin.

Untuk melihat pengaruh penyesuaian alat ekspansi dan refrigeran baru pada refrigerator, pada uji coba ini, dibuat tiga alat ekspansi dengan dimensi berbeda-beda. Alat ekspansi pertama memiliki panjang yang sama yaitu 3 meter, namun diameternya lebih besar yaitu  $d = 0,9144$  mm. Alat ekspansi kedua memiliki panjang 3,62 meter dan diameter 0,9144 mm. kemudian alat ekspansi ketiga memiliki panjang 4 meter dan diameter 0,9144 mm. Gambar 2 menunjukkan posisi dan kondisi alat ekspansi pipa kapiler dapat dilihat.



Gambar 2. Posisi dan Kondisi Alat Ekspansi Pipa Kapiler

Pengujian dilakukan dalam dua tahap dengan beban pendinginan larutan garam NaCl untuk mengukur kinerja refrigerator sebelum dan setelah di *retrofit* dengan penyesuaian komponen utamanya. Pada pengujian tahap pertama

refrigerator beroperasi dengan refrigeran R-134 dan komponen asal pabrik pembuatnya (variasi 1). Selanjutnya pada tahap kedua refrigerator beroperasi dengan refrigeran natural MC-22 dan penyesuaian komponen utama *expansion valve*. Pada tahap ini refrigerator beroperasi dengan variasi 2 (refrigeran MC-22, komponen sama dengan pabriknya), variasi 3 (refrigeran MC-22, komponen disesuaikan), variasi 4 (refrigeran MC-22, komponen disesuaikan), dan variasi 5 (refrigeran MC-22, komponen disesuaikan). Tabel 2 menunjukkan pengujian tahap pertama dan tahap kedua beserta variasinya. Saat pengujian refrigerator diatur agar terus beroperasi selama 61 menit untuk mengetahui kinerja refrigeran R-134a dan MC-22 sebagai fluida kerja di dalam refrigerator.



Gambar 3. *Set Up* Alat Pengujian Mesin Pendingin Refrigerator

Pada pengujian tahap pertama, mula-mula refrigerator divakum selama 20 menit untuk mengeluarkan seluruh udara, uap air, dan kotoran yang ada di dalam instalasi perpipaan. Selanjutnya HV1 dibuka dan HV2, HV3, dan HV4 ditutup. Selanjutnya refrigerator diisi dengan refrigeran R-134a sebanyak 100 gram sambil dioperasikan. Selanjutnya data temperatur dan data tekanan diambil setiap menit untuk mengetahui kinerja refrigerator saat beroperasi dengan variasi 1.

Tabel 2. Variasi Pengujian Refrigerator

Pengujian tahap	Variasi Pengujian Refrigerator	Refrigeran		Capillary Tube			
		R-134a	MC-22	CT1 (d=0,7874 mm, P=3m)	CT2 (d=0,9144 mm, P=3m)	CT3 (d=0,9144 mm, P=3,62m)	CT4 (d=0,9144 mm, P=4m)
Pertama	Variasi 1	√		√			
	Variasi 2		√	√			
Kedua	Variasi 3		√		√		
	Variasi 4		√			√	
	Variasi 5		√				√

Pengujian tahap kedua diawali dengan *me-recovery* refrigeran R-134a ke dalam tabung kosong. Selanjutnya refrigerator di vakum lagi untuk mengeluarkan udara, uap air, dan kotoran seperti pada tahap pertama. HV 1 dibuka dan kran yang lain ditutup (pengujian menggunakan variasi 2) sebelum diisi refrigeran. Selanjutnya refrigerator diisi dengan refrigeran MC-22 sebanyak 30 gram sambil dioperasikan. Jumlah massa ini digunakan, karena merupakan massa refrigeran optimum yang menghasilkan kinerja terbaik pada penelitian sebelumnya tahun 2019 di Laboratorium Refrigerasi UPI. Data temperatur dan tekanan diambil setiap menit seperti pada pengujian tahap pertama. Setelah refrigerator beroperasi selama 61 dengan variasi 2, selanjutnya refrigerator dimatikan. Selanjutnya refrigerator didiamkan sampai temperatur dan tekanan kembali seperti kondisi awal sebelum dioperasikan. Setelah kondisi temperatur dan tekanan kembali seperti kondisi semula, pengujian tahap kedua dilakukan dengan variasi 3 (membuka HV 2 dibuka dan HV yang lain ditutup). Refrigerator dioperasikan selama 61 menit dengan interval pengambilan data setiap menit. Selanjutnya pengujian tahap kedua dengan variasi 4 dan variasi 5 dilakukan sebagaimana prosedur pada variasi 3 yaitu setelah 61 menit beroperasi refrigerator dimatikan terlebih dahulu dan didiamkan agar kondisi temperatur dan tekanan kembali seperti semula.

Data tekanan dan temperatur diplot pada diagram p-h Miller untuk mendapatkan nilai *enthalpy* pada saluran masuk dan saluran keluar evaporator, kompresor, dan *condenser*. Proses pendinginan diasumsikan terjadi secara ideal mengikuti siklus Carnot ideal. Nilai *enthalpy* masuk/ke luar evaporator, *enthalpy* masuk/ke luar kompresor, dan *enthalpy* masuk/ke luar *condenser* digunakan untuk menghitung parameter kinerja refrigerator diantaranya *Refrigerating Effect* (RE), *Heat of Compression* ( $W_k$ ), dan angka kinerja (COP). Parameter kinerja refrigerator dihitung dengan persamaan (1), (2), dan (3).

$$RE = h_1 - h_3 \quad (1)$$

$$W_k = h_2 - h_1 \quad (2)$$

$$COP = \frac{RE}{W_k} \quad (3)$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian mesin pendingin refrigerator berdasarkan variasi jenis refrigeran dan ukuran pipa kapiler dengan beban pendinginan larutan garam (NaCl) telah dilakukan. Pengujian dilakukan selama 61 menit dengan interval waktu pengambilan data setiap menit. Data awal yang dibutuhkan untuk mengukur kinerja refrigeran pada mesin pendingin adalah temperatur evaporator dan temperatur *condenser*. Tabel 3 menyajikan data hasil pengukuran temperatur evaporator dan tabel 4 menyajikan data hasil pengukuran temperatur *condenser*.

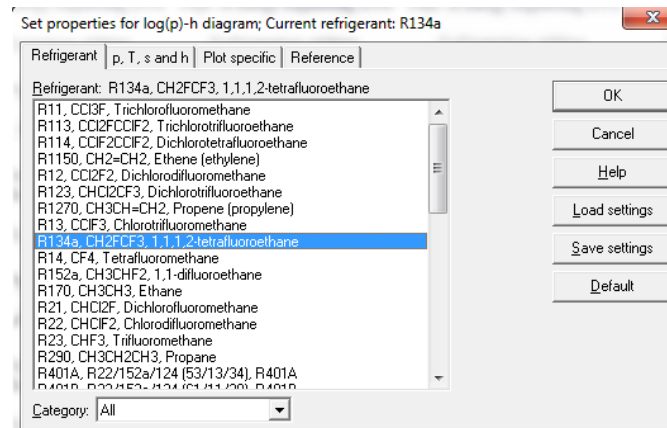
Tabel 3. Data Temperatur Evaporator Hasil Pengujian

t (menit)	T evaporator (°C)				
	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4	Variasi 5
50	-21,7	-25,5	-18,3	-21,1	-20,8
51	-21,9	-25,3	-18,3	-21,1	-20,9
52	-22	-25,4	-18,3	-21,2	-20,8
53	-22	-25,5	-18,3	-21,3	-20,8
54	-22,2	-25,4	-18,4	-21,5	-20,8
55	-22,4	-25,5	-18,6	-21,6	-20,7
56	-22,4	-25,6	-18,5	-21,7	-20,9
57	-22,4	-25,6	-18,8	-21,7	-21
58	-22,5	-25,5	-18,6	-21,4	-20,8
59	-22,6	-25,5	-18,6	-21,2	-20,7
60	-22,3	-25,5	-18,6	-21,2	-20,9
61	-22,6	-25,8	-18,6	-21,2	-20,8

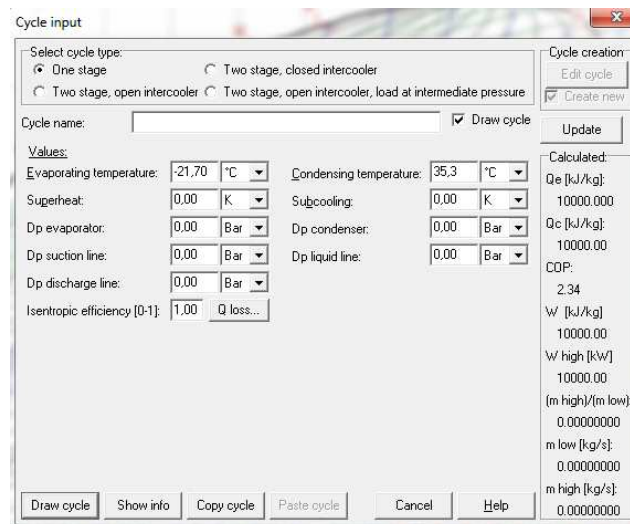
Tabel 4. Data Temperatur Condenser Hasil Pengujian

t (menit)	T condenser (°C)				
	Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4	Variasi 5
50	35,3	35,7	37,8	36,6	36,5
51	35,4	35,8	37,8	36,6	36,5
52	35,4	35,7	37,7	36,5	36,4
53	35,3	35,6	37,7	36,3	36,3
54	35,2	35,6	37,7	36,4	36,2
55	35,1	35,4	37,8	36,3	36,1
56	34,8	35,3	38	36,2	36,1
57	34,7	35,5	38,3	36,4	36,3
58	34,8	35,5	38,3	36,4	36,3
59	34,8	35,7	38,2	36,4	36,5
60	34,8	35,9	37,9	36,2	36,4
61	34,9	35,8	37,9	36,1	36,3

Selanjutnya kinerja mesin pendingin dihitung dengan menggunakan *software CoolPack* versi 1,5 bagian analisis *refrigeration utilities* yang dapat diakses secara terbuka pada [www.ipu.dk](http://www.ipu.dk), Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark. Kinerja mesin pendingin dihitung dengan asumsi siklus refrigerasi kompresi uap beroperasi sebagaimana siklus Carnot ideal. Dengan asumsi bahwa fluida kerja refrigeran saat masuk atau ke luar komponen utama mesin pendingin berada pada garis jenuh diagram p-h. Gambar 4 menyajikan tampilan *CoolPack* pada bagian *refrigeration utilities*. Bagian ini dapat menganalisis kinerja berbagai jenis refrigeran pada mesin pendingin dengan sistem refrigerasi kompresi uap. Mula-mula, buka aplikasi *CoolPack*, kemudian pilih menu *refrigeration utilities* untuk menganalisis kinerja refrigeran dalam mesin pendingin. Selanjutnya pastikan *properties* refrigeran yang digunakan sesuai dengan refrigeran yang akan dianalisis. Gambar 4 menunjukkan pemilihan jenis refrigeran yang akan dianalisis.

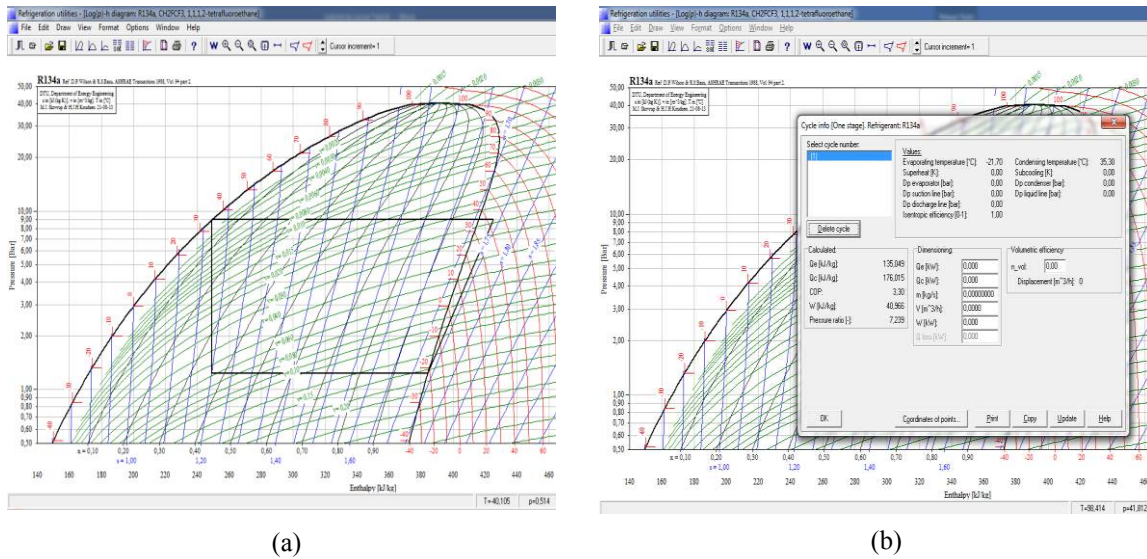
Gambar 4. Tampilan *CoolPack* pada Bagian *Properties* Refrigeran

Selanjutnya untuk menganalisis kinerja refrigeran dibutuhkan minimal dua data temperatur evaporator dan *condenser*. Selain temperatur, juga bisa menggunakan data tekanan evaporator dan *condenser*. Pada penelitian ini digunakan data temperatur. Data temperatur evaporator dan temperatur *condenser* pada rentang pengambilan data menit ke-50 sampai menit ke 61 dimasukkan ke *cycle input CoolPack*.

Gambar 5. Data Temperatur Evaporator dan *Condenser* dimasukkan ke *Cycle Input CoolPack*

Pada gambar 5, disajikan simulasi pengukuran kinerja mesin pendingin dengan menggunakan parameter temperatur evaporator dan *condenser*. Data temperatur evaporator (tabel 3) dan temperatur *condenser* (tabel 4) saat mesin pendingin beroperasi dengan variasi 1 dimasukkan pada kolom *Evaporating temperatur* dan *Condensing temperatur*. Pada kasus ini, diasumsikan sistem bekerja secara ideal, sehingga selain temperatur evaporator dan *condenser* dibiarkan sebagaimana kondisi *default* (kondisi asalnya). Hasil analisis *CoolPack* memberikan luaran sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 6 berupa (a) *plotting* siklus refrigeran pada Diagram p-h dan (b) Kalkulasi Kinerja refrigeran dalam mesin pendingin refrigerator. Kalkulasi kinerja berupa parameter *Refrigerating Effect*, kalor kerja kompresor, dan COP. Parameter-parameter ini merupakan faktor penentu kinerja mesin pendingin yang menggunakan siklus kompresi uap.

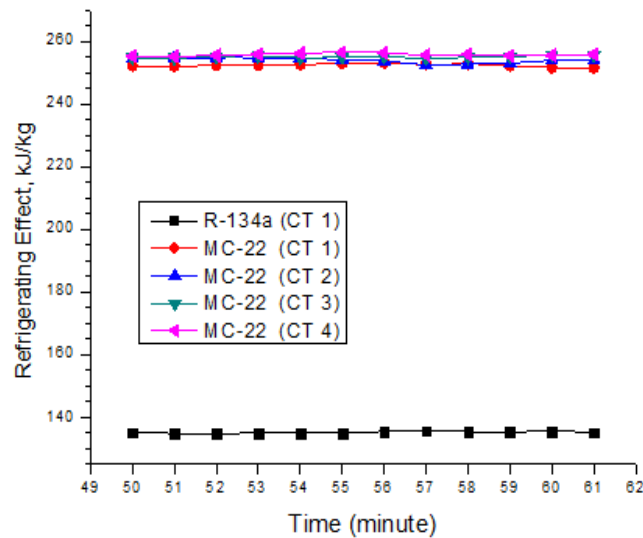
Selanjutnya untuk melihat perbandingan kinerja mesin pendingin refrigerator dengan lebih jelas saat beroperasi dengan variasi 1, variasi 2, variasi 3, variasi 4, dan variasi 5, hasil pengujian disajikan dalam bentuk diagram grafik. Diagram grafik *Refrigerating Effect*, kalor kerja kompresor, dan COP (*Coefficient of Performance*) terhadap interval waktu, disajikan pada pembahasan berikut.



Gambar 6. Hasil Analisis CoolPack, (a) Plotting Siklus Refrigeran pada Diagram p-h, (b) Kalkulasi Kinerja

**Refrigerating Effect (RE)**

RE merupakan salah satu parameter kinerja refrigerator. Parameter ini menunjukkan banyaknya kalor dari produk (larutan garam NaCl) yang dapat diserap oleh refrigeran di dalam pipa evaporator. Gambar 7 menyajikan grafik Refrigerating Effect terhadap interval waktu hasil pengujian refrigerator dengan variasi 1 (R-134a, CT1), variasi 2 (MC-22, CT1), variasi 3 (MC-22, CT2), variasi 4 (MC-22, CT3), dan variasi 5 (MC-22, CT4).



Gambar 7. Grafik RE terhadap Waktu

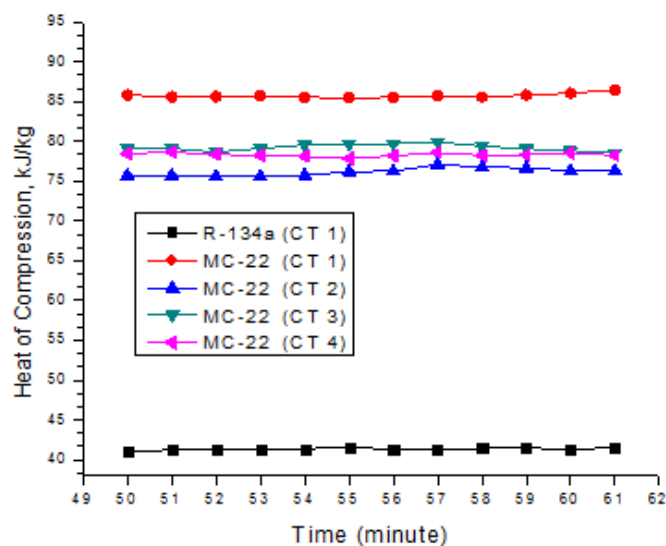
Berdasarkan gambar 7 grafik Refrigerating Effect terhadap interval waktu, terlihat bahwa nilai RE dari menit ke-50 sampai menit ke-61 refrigerator yang menggunakan refrigeran MC-22 dengan berbagai variasi dimensi pipa kapiler selalu lebih tinggi dibandingkan dengan saat refrigerator menggunakan R-134a. Nilai RE saat refrigerator beroperasi dengan variasi 1 berkisar 134,72 kJ/kg sampai 135,50 kJ/kg, kemudian nilai RE saat beroperasi dengan variasi 2 berkisar 251,52 kJ/kg sampai 253,14 kJ/kg, kemudian saat beroperasi dengan variasi 3 nilai RE berkisar 252,48 kJ/kg sampai 254,73 kJ/kg, kemudian saat beroperasi dengan variasi 4 nilai RE berkisar 254,52 kJ/kg sampai 255,64 kJ/kg, dan saat beroperasi dengan variasi 5 nilai RE berkisar 255,15 kJ/kg sampai 256,49 kJ/kg.

Hasil dari gambar 7 grafik RE terhadap waktu menunjukkan bahwa retrofit refrigeran dari R-134a ke natural refrigeran MC-22 memberikan dampak positif terhadap mesin pendingin refrigerator. Dampak positif ini ditunjukkan oleh nilai RE variasi 2 sampai variasi 5 yang selalu lebih tinggi pada setiap interval waktu pengambilan data dibandingkan nilai RE variasi 1 yang menggunakan refrigeran dan komponen pabrikannya. Hasil ini senada dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Mutaufiq, dkk pada tahun 2019 yang melakukan penggantian R-134a ke MC-22 dengan metode drop in substitute, saat refrigeran asalnya diganti menggunakan MC-22, nilai RE naik yang

ditunjukkan oleh gambar 7 variasi 2 (komponen tidak disesuaikan). Selain itu ketika komponen alat ekspansinya disesuaikan, ternyata nilai RE-nya juga menjadi lebih baik dibandingkan dengan variasi 1 dan variasi 2. Penambahan panjang alat ekspansi pipa kapiler sampai 4 meter menunjukkan tren yang baik untuk nilai RE yang semakin besar, terlihat pada gambar 7 variasi 3 sampai variasi 5. Untuk sementara, variasi 5 menunjukkan dampak paling baik terhadap mesin pendingin. Hanya saja dampak penyesuaian pipa kapiler juga perlu diperhatikan terhadap *heat of compression* yang sangat berpengaruh terhadap angka kinerja (COP) mesin pendingin.

### Heat of Compression

*Heat of compression* merupakan kalor yang dihasilkan dari kerja kompresor untuk menaikkan tekanan refrigeran dari tekanan evaporasi ke tekanan kondensasi. Kerja kompresor diperlukan untuk menaikkan tekanan refrigeran uap sampai tekanan kondensasi di *condenser* agar refrigeran uap dapat berubah fase menjadi refrigeran cair. perhatikan gambar 8 grafik *heat of compression* terhadap interval waktu. Gambar ini menyajikan kalor kerja kompresor pada rentang waktu pengambilan data menit ke-50 sampai menit ke-61 saat mesin pendingin beroperasi dengan variasi 1 (R-134a, CT1), variasi 2 (MC-22, CT1), variasi 3 (MC-22, CT2), variasi 4 (MC-22, CT3), dan variasi 5 (MC-22, CT4).



Gambar 8. Grafik *Heat of Compression* terhadap Waktu

Berdasarkan gambar 8 grafik kalor kerja kompresi terhadap interval waktu, terlihat bahwa kalor kerja kompresi refrigerator berbanding terbalik dengan grafik *refrigerating effect* terhadap interval waktu pada gambar 7. Kalor kerja kompresi refrigerator saat beroperasi dengan variasi 2 sampai variasi 5 lebih besar dibandingkan saat beroperasi dengan variasi 1. Nilai kalor kerja kompresi saat bekerja dengan variasi 1 berkisar 40,97 kJ/kg sampai 41,55 kJ/kg, saat beroperasi dengan variasi 2 berkisar 85,48 kJ/kg sampai 86,48 kJ/kg, saat beroperasi dengan variasi 3 berkisar 75,58 kJ/kg sampai 77,10 kJ/kg, saat beroperasi dengan variasi 4 berkisar 78,53 kJ/kg sampai 79,92 kJ/kg, saat beroperasi dengan variasi 5 berkisar 77,84 kJ/kg sampai 78,65 kJ/kg.

Hasil ini menunjukkan kompresor bekerja lebih berat saat beroperasi menggunakan MC-22 baik menggunakan ukuran pipa kapiler asal pabrikannya atau menggunakan penyesuaian ukuran pipa kapiler pada variasi 3 sampai variasi 5. Ini tentu saja merugikan kinerja sistem pendingin, karena nilai kalor kerja kompresor merupakan pembagi untuk mendapatkan angka kinerja (COP) mesin pendingin, seperti ditunjukkan oleh persamaan 3 di atas. Jika diperhatikan, dari seluruh variasi uji coba menggunakan MC-22, nilai kalor kerja kompresor cukup rendah terjadi saat mesin pendingin beroperasi dengan variasi 3 dan variasi 5. Sehingga ketika mesin pendingin beroperasi dengan kedua variasi ini, berpotensi menunjukkan angka kinerja (COP) paling baik.

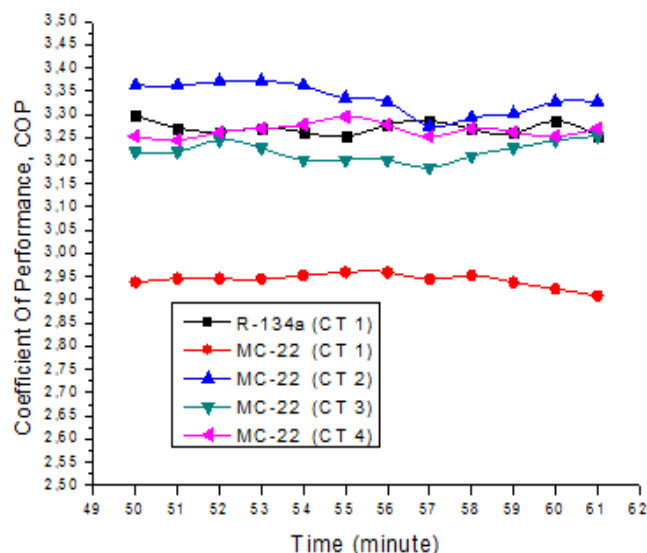
### COP (Coefficient of Performance)

COP merupakan angka kinerja refrigerator yang diperoleh dari perbandingan nilai *refrigerating effect* dengan kalor kerja kompresi kompresor. Berdasarkan hasil pembahasan nilai *refrigerating effect* dan kalor kerja kompresi di atas menunjukkan hasil yang berlawanan. Nilai RE refrigerator saat beroperasi menggunakan R-134a lebih buruk dibandingkan saat menggunakan MC-22 dan nilai kalor kerja kompresi refrigerator lebih baik saat menggunakan R-134a dibandingkan saat beroperasi menggunakan MC-22. Sehingga nilai COP bervariasi tergantung kenaikan dan penurunan nilai *refrigerating effect* dan kalor kerja kompresi kompresor.

Nilai COP pada rentang waktu menit ke-50 sampai menit ke-61 disajikan pada gambar 9 grafik COP terhadap interval waktu. Nilai COP saat refrigerator beroperasi dengan variasi 1 berkisar dari 3,25 sampai 3,30, variasi 2



berkisar dari 2,91 sampai 2,96, variasi 3 berkisar dari 3,27 sampai 3,37, variasi 4 berkisar dari 3,18 sampai 3,25, variasi 5 berkisar dari 3,24 sampai 3,29. Berdasarkan data-data tersebut mesin pendingin refrigerator bekerja dengan kinerja terbaik saat beroperasi dengan variasi 3 (refrigeran MC-22 dan pipa kapiler CT 2), dengan kenaikan nilai COP 0,62% sampai 2,12% daripada refrigerator yang beroperasi dengan kondisi asalnya. Ini menunjukkan bahwa penyesuaian komponen utama pipa kapiler memberikan dampak positif terhadap kinerja siklus refrigerasi kompresi uap mesin pendingin.



Gambar 9. Grafik COP terhadap Waktu

Nilai COP refrigerator menggunakan refrigeran hidrokarbon pada variasi 3 hanya sedikit lebih baik dibandingkan refrigerator yang beroperasi pada kondisi asalnya. Berbeda dengan hasil penelitian yang diperoleh oleh Thavamani dan Senthil, saat melakukan penggantian refrigeran pada refrigerator menggunakan refrigeran campuran propana 49% dengan butana 51%. Nilai COP refrigerator menggunakan hidrokarbon 40% lebih baik dibandingkan saat beroperasi menggunakan refrigeran 134a (Thavamani & Senthil, 2020). Sehingga untuk penelitian selanjutnya, campuran ini perlu diuji coba pada alat peraga refrigerator di Laboratorium Refrigerasi.

### Kesimpulan

Eksperimen investigasi kinerja refrigerator setelah di-*retrofit* menggunakan refrigeran baru yang ramah lingkungan telah dilakukan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa angka kinerja (COP) refrigerator terbaik adalah saat refrigerator beroperasi dengan variasi 3 (refrigeran MC-22, alat ekspansi CT2) dengan kenaikan nilai COP berkisar dari 0,62% sampai 2,12% dari refrigerator yang beroperasi dengan kondisi asalnya.

### Ucapan Terima Kasih

Alhamdulillah. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Pendidikan Indonesia atas dukungan finansial yang diberikan untuk penelitian ini, di bawah hibah Penelitian Untuk Tenaga Kependidikan No 1079 / UN40 / PM / 2020. Selain itu ucapan terima kasih kepada *IPU and Departement of Mechanical Engineering Technical University of Denmark* yang telah memberikan layanan *software CoolPack* versi 1,5 secara gratis untuk menganalisis kinerja mesin pendingin.

### Daftar Notasi

T	= temperatur [°C]
t	= waktu [menit]
RE	= <i>Refrigerating Effect</i> [kJ/kg]
$W_k$	= kerja kompresor [kJ/kg]
COP	= angka kinerja siklus refrigerasi [tidak ada satuan]
$h_1$	= <i>specific enthalpy</i> refrigeran keluar evaporator [kJ/kg]
$h_2$	= <i>specific enthalpy</i> refrigeran keluar kompresor [kJ/kg]
$h_3$	= <i>specific enthalpy</i> refrigeran masuk evaporator [kJ/kg]
P	= panjang kapiler [m]
d	= diameter kapiler [mm]
m	= massa [gram]

**Daftar Pustaka**

- Apra, C., Greco, A., & Maiorino, A. (2016). An experimental investigation on the substitution of HFC134a with HFO1234YF in a domestic refrigerator. *Applied Thermal Engineering*, 106(2016), 959–967. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.098>
- El-Sayed, A. R., El-Morsi, M., & Mahmoud, N. A. (2018). A Review of the Potential Replacements of HCFC/HFCs Using Environmental Friendly Refrigerants. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*. <https://doi.org/10.1142/S2010132518300021>
- Elgendy, E., Hassanain, M., & Fatouh, M. (2015). Assessment of R-438A as a retrofit refrigerant for R-22 in direct expansion water chiller. *International Journal of Refrigeration*, 50, 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.07.017>
- Fatouh, M., & Abou-Ziyan, H. (2018). Energy and exergy analysis of a household refrigerator using a ternary hydrocarbon mixture in tropical environment – Effects of refrigerant charge and capillary length. *Applied Thermal Engineering*, 145, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.008>
- Harby, K. (2017). Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental unfriendly halogenated refrigerants: An updated overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73(February), 1247–1264. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.039>
- Hossain, R., Arafat, A., Fei, A. B., Abu, X., Sujon, S., & Karim, R. (2019). Comparative analysis of refrigerant performance between LPG and R134a under subtropical climate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09126-3>
- Jatinder, G., Ohunakin, O. S., Adelekan, D. S., Atiba, O. E., Daniel, A. B., Singh, J., & Atayero, A. A. (2019). Performance of a domestic refrigerator using selected hydrocarbon working fluids and TiO<sub>2</sub> – MO nanolubricant. 160(February). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114004>
- Kanna, I. V. (2018). Optimisation of the evaporator of a refrigerator employing hydrocarbon as a refrigerant. *International Journal of Ambient Energy*, 0(0), 1–8. <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1507943>
- Mohanraj, M. (2019). Experimental investigations on R430A as a drop-in substitute for R134a in domestic refrigerators. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 233(4), 728–738. <https://doi.org/10.1177/0954408918796369>
- Mutaufiq, Sulistyono, H., Berman, E. T., & Wiyono, A. (2019). Investigasi Eksperimental Retrofit Refrigeran Pada Alat Praktik Refrigerator dengan Refrigeran Produk Domestik yang Ramah Lingkungan. *Flywheel: Jurnal Teknik Mesin UNTIRTA*, 5(2), 51–57.
- Safety Data Sheet MC-22*. (2017). PT Pertamina Persero.
- Sari, O., & Balli, M. (2014). From conventional to magnetic refrigerator technology. *International Journal of Refrigeration*, 37(1), 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.09.027>
- Thavamani, J., & Senthil, R. (2020). Performance analysis of retrofitted domestic vapor compression refrigeration system using hydrocarbon refrigerants. *International Journal of Ambient Energy*, 0(0), 1–25. <https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1751284>
- UNEP. (2015). *The Emissions Gap Report 2015* (pp. 1–98). pp. 1–98. Retrieved from [https://uneplive.unep.org/media/docs/theme/13/EGR\\_2015\\_301115\\_lores.pdf](https://uneplive.unep.org/media/docs/theme/13/EGR_2015_301115_lores.pdf)
- Wang, X., & Yu, J. (2015). An experimental investigation on a novel ejector enhanced refrigeration cycle applied in the domestic refrigerator-freezer. *Energy*, 93, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.038>
- Yu, C. C., & Teng, T. P. (2014). Retrofit assessment of refrigerator using hydrocarbon refrigerants. *Applied Thermal Engineering*, 66(1–2), 507–518. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.050>

## Unit Ultrafiltrasi-Karbon Aktif-Resin Penukar Ion Terintegrasi untuk Pengolahan Air Sumur Menjadi Air Minum

Putu Teta Prihartini Aryanti<sup>1</sup>, Tania Finarianingrum<sup>2</sup>, Annisa Rakhmawati Darlis<sup>3</sup>, Fahmi Widjaya<sup>4</sup>, dan Adhani Nur Fajrina<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

<sup>1</sup>[p.teta@lecture.unjani.ac.id](mailto:p.teta@lecture.unjani.ac.id), <sup>2</sup>[taniafinarianingrum@gmail.com](mailto:taniafinarianingrum@gmail.com), <sup>3</sup>[annisardarlis@gmail.com](mailto:annisardarlis@gmail.com), <sup>4</sup>[fahmiisays@gmail.com](mailto:fahmiisays@gmail.com),

<sup>5</sup>[adhaninf@gmail.com](mailto:adhaninf@gmail.com)

### Abstrak

Ketersediaan air sumur yang terbebas dari kontaminan organik dan zat mineral masih menjadi permasalahan di beberapa daerah di Indonesia. Pada umumnya, air sumur diolah secara fisik dengan menggunakan sand filter dan adsorben (karbon aktif atau zeolit) atau integrasi keduanya. Walaupun prosesnya sederhana, produk air belum memenuhi standar baku mutu air minum. Penelitian ini mengusulkan teknologi terintegrasi ultrafiltrasi berbasis polisulfon (UF), karbon aktif (KA), dan resin penukar ion (*Ion Exchange/IE*) sebagai alternatif pengolahan air sumur menjadi air baku untuk minum. Membran UF memiliki fluks permeat sebesar 42 L.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>. Hasil analisa menggunakan model Hermia menunjukkan bahwa fouling yang terbentuk didominasi oleh fouling total dan standard dengan nilai R<sup>2</sup> masing-masing sebesar 0.8989 dan 0.8952. Selama 2 (dua) jam proses filtrasi, penurunan fluks permeat sebesar 19%. Berdasarkan data hasil analisa produk air, unit UF-KA mampu menurunkan kesadahan, zat organik, zat besi, dan kontaminan lainnya hingga di bawah nilai ambang batas kontaminan untuk standar baku mutu air minum. Namun konsentrasi senyawa mangan masih sebesar 0,601 mg/L di atas ambang batas standar (0,4 mg/L). Dengan penambahan unit IE setelah proses UF-KA, produk air yang dihasilkan memenuhi standar baku mutu air minum. Penyisihan turbiditas, besi, dan mangan untuk unit UF-KA-IE adalah masing-masing sebesar 95,9%; 99,9%; dan 72,5%.

Kata kunci: Air Minum, Karbon Aktif, Pengolahan Air, Resin Penukar Ion, Ultrafiltrasi.

### Abstract

The availability of healthy well water is still become a problem in several areas in Indonesia, including Cimahi City, West Java. In general, the well water is treated using sand filter and adsorbent (either activated carbon or zeolite). However, the conventional methods produced unsafe drinking water, which does not meet drinking water standards. This study proposed integrated polysulfone ultrafiltration (UF), activated carbon (KA), and ion exchange resin (IE), as an alternative technology. The UF membrane provided a permeate flux of 42 L.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>. Based on Hermia's model, the fouling was dominated by total and standard fouling with R<sup>2</sup> values of 0.8989 and 0.8952, respectively. During the 2 (two) hours of filtration, the permeate flux decreased by 19%. Based on data from the analysis of water products, the UF-KA unit reduced hardness, organic matter, iron, and other contaminants to below the threshold value for drinking water quality standards. However, the concentration of manganese compounds was still 0.601 mg/L above the standard threshold (0.4 mg/L). With the addition of the IE unit after the UF-KA process, the water products produced meet the drinking water quality standards. The removal of turbidity, iron, and manganese by the UF-KA-IE was 95.9%, 99.9%, and 72.5%.

Keywords: Drinking Water, Activated Carbon, Water Treatment, Ion Exchange Resin, Ultrafiltration

### 1. Pendahuluan

Sebagian wilayah di Indonesia masih memiliki permasalahan ketersediaan air bersih untuk minum, termasuk kota Cimahi, Jawa Barat (Aryanti *dkk.*, 2020a). Sumber air yang diperoleh dari sumur umumnya masih mengandung kontaminan organik maupun mineral yang tinggi, sehingga tidak layak untuk dikonsumsi secara langsung (Aryanti *dkk.*, 2020b). Kandungan kontaminan dalam air sumur, terutama zat besi (Fe) dan mangan (Mn), dapat menyebabkan bau dan rasa pada air serta meninggalkan lapisan berwarna kuning pada tempat penampungan air (Gozali *dkk.*, 2020). Keberadaan kedua zat tersebut dapat menimbulkan endapan pada sistem saluran air, noda pada pakaian, serta bau pada air baku.

Secara umum, pengolahan air sumur yang digunakan oleh masyarakat adalah pengolahan secara fisik, berupa *sand filter*, karbon aktif, atau zeolit karena sistem operasi yang sederhana dan biaya operasional yang rendah (Mande *dkk.*, 2018; Yusuf *dkk.*, 2021). Pengolahan dengan teknik penjerapan (adsorpsi) tersebut masih belum dapat menghilangkan

#### Info Makalah:

Dikirim : 09-26-21;

Revisi 1 : 11-02-21;

Diterima : 11-11-21.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +62 812-2122-3985

e-mail : [p.teta@lecture.unjani.ac.id](mailto:p.teta@lecture.unjani.ac.id)

partikel terlarut secara sempurna, terutama untuk sumber air mengandung partikulat dan mineral yang tinggi (Ranjan & Prem, 2018). Selain itu, proses regenerasi dari adsorben menggunakan bahan kimia, sehingga perlu tambahan biaya operasional.

Dalam pengolahan air permukaan, teknologi membran telah digunakan sebagai alternatif proses konvensional untuk menghasilkan air minum yang

bebas akan kontaminan (Aryanti *dkk.*, 2015; Wenten *dkk.*, 2017; Yu *dkk.*, 2020). Teknologi membran menawarkan beberapa keunggulan, seperti konsumsi energi yang rendah, sistem operasi yang sederhana, kebutuhan lahan yang lebih kecil karena desain sistem membran yang bersifat modular, dan ramah terhadap lingkungan (Aryanti *dkk.*, 2016; Wenten *dkk.*, 2016). Salah satu teknologi membran yang umum digunakan untuk pengolahan air adalah ultrafiltrasi (UF). Membran UF dapat beroperasi pada tekanan rendah yaitu 1 – 2 bar, serta memiliki ukuran pori 0,001  $\mu\text{m}$  (1 nm) – 0,1  $\mu\text{m}$  (100 nm) atau MWCO antara 10,000 – 100,000 dalton (Zeman & Zydney, 1996). Karena ukuran pori yang sangat kecil, mikroorganisme seperti virus, patogen, dan bakteri mampu disisihkan oleh membran UF sehingga air yang dihasilkan layak dikonsumsi secara langsung (Baker, 2012; Guo *dkk.*, 2018). Pada beberapa kasus, membran UF dapat digunakan untuk menyisihkan partikulat sekaligus sebagai unit desinfeksi dalam menghasilkan kualitas air minum (Guo *dkk.*, 2018; Oka *dkk.*, 2017).

Beberapa penelitian telah dilakukan terkait dengan aplikasi membran UF untuk mengolah air baku menjadi air minum. Xu *dkk.* (2019) membandingkan performa filter pasir atau sand filter (SF) dengan membran UF dalam kemampuan penyisihan senyawa organik dalam air. Filter pasir yang digunakan adalah pasir silika atau pasir aktif yang diaktivasi menggunakan pelarut  $\text{KMnO}_4$ . Membran UF menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam menyisihkan senyawa organik berberat molekul tinggi (MW) dibandingkan SF. Namun dalam penyisihan senyawa organik berberat molekul rendah, unit SF memiliki kemampuan lebih baik dibandingkan dengan membran UF. Ditemukan juga bahwa membran UF mampu menyisihkan alga hingga 98,7%. Cheng *dkk.* (2020) menggunakan unit SF sebagai pre-treatment membran UF untuk meminimalisasi fouling pada membran. Konsep yang sama juga diterapkan oleh Guo *dkk.* (2018), di mana integrasi unit SF dan UF mampu menyisihkan COD dan DOC dalam air sebesar 30% dan 17%. Selain SF, membran UF juga dapat diintegrasikan dengan unit lainnya, terutama untuk meminimalisasi *fouling*. Yu *dkk.* (2021) menggunakan kombinasi kolagulasi dan ultrafiltrasi rotasi untuk pengolahan air baku menjadi air minum. *Fouling* pada membran UF dapat diminimalisasi dengan proses koagulasi sebagai *pre-treatment*.

Kombinasi lain dengan karbon aktif (KA) dan resin penukar ion (IE) juga telah dilakukan untuk meningkatkan kualitas produk air. Karbon aktif memiliki daya adsorpsi yang tinggi terhadap detergen, senyawa fenol, warna dalam air, gas metana, dan senyawa organik (Said, 2007). Terdapat dua (2) jenis karbon aktif yang umum digunakan untuk pengolahan air, yaitu berbentuk butiran atau granular (*granular activated carbon/GAC*) dan bubuk atau powder (*powdered activated carbon/PAC*) (Delgado *dkk.*, 2019). Beberapa konfigurasi integrasi UF – KA telah dipelajari pada penelitian terdahulu, yaitu dengan meletakkan karbon aktif pada: (i) sebelum unit membran sebagai *pre-treatment* (Cheng *dkk.*, 2019), (ii) integrasi UF-KA dalam satu modul (*single unit*) (Zhang *dkk.*, 2019), dan (iii) setelah unit membran sebagai *post-treatment* (Tagliavini *dkk.*, 2020). Pada konfigurasi pertama, unit KA berfungsi menghilangkan kontaminan yang dapat menyebabkan *fouling* pada membran. Kelemahan pada konfigurasi yang pertama adalah cepatnya unit karbon aktif untuk jenuh jika digunakan untuk mengolah air dengan kandungan senyawa organik dan senyawa logam yang tinggi. Unit KA yang telah jenuh perlu proses regenerasi dengan menggunakan bahan kimia, yang tentunya akan berdampak pada penambahan biaya operasional (Silva *dkk.*, 2015).

Dalam pengolahan air, resin penukar ion umumnya digunakan untuk menghilangkan kesadahan dalam air (Rangreez & Asiri, 2019). Prinsip kerja dari resin penukar ion adalah kombinasi antara adsorpsi permukaan dan daya tarik elektrostatis ke gugus fungsi yang ada pada rantai polimer. Regenerasi unit IE umumnya menggunakan bahan kimia, diantaranya adalah garam ( $\text{NaCl}$  dan  $\text{KCl}$ ), asam (asam asetat dan asam sitrat), dan alkali ( $\text{NaOH}$  dan  $\text{KOH}$ ). Bergantung pada ion yang akan ditukar, penukar ion dapat dibagi menjadi penukar kation dan anion. Pertukaran kation dan anion secara simultan juga dapat dilakukan dengan menggunakan jenis bahan tertentu (penukar ion amfoter) (Abe, 2018). Yu *dkk.* (2019) menggunakan media pertukaran ion magnetik (MIEX) sebagai *pre-treatment* UF. *Fouling* pada membran UF terlihat pada waktu operasi sekitar 60 hari. Instalasi MIEX sebelum UF meningkatkan penyisihan mikropolutan organik hingga 64 – 74% (Chen *dkk.*, 2019). Pada umumnya, unit IE diletakkan sebagai *post treatment* membran untuk menghindari cepat jenuhnya resin penukar ion. Seperti KA, regenerasi IE memerlukan bahan kimia dan dapat berdampak pada biaya operasional (Keskitalo *dkk.*, 2007). Jika dibuang secara langsung maka akan berdampak buruk bagi lingkungan.

Jika penelitian sebelumnya menempatkan unit adsorpsi sebagai *pre-treatment* membran UF, maka dalam penelitian ini unit-unit tersebut ditempatkan sebagai *post treatment*. Konfigurasi tersebut bertujuan agar beban kerja unit adsorpsi menjadi lebih rendah, sehingga umur pakai unit adsorpsi menjadi lebih panjang. Pengaruh konfigurasi *post-treatment* dan performa unit membran UF untuk pengolahan air sumur diinvestigasi lebih lanjut terhadap kualitas produk air. Membran UF yang digunakan adalah berbasis polisulfon (PSF) hollow fiber, yang dirangkai dalam modul pipa polivinil klorida (PVC). Tiga jenis *post-treatment* yang digunakan dalam studi ini adalah karbon aktif (KA), filter pasir aktif (SF), dan resin penukar ion (IE). Pengaruh unit terintegrasi UF-KA dan UF-KA-IE dibandingkan untuk mengetahui hasil produk yang lebih baik untuk dapat digunakan sebagai air minum. Sampel air sumur diperoleh dari salah satu perumahan di Kota Cimahi.

**2. Material dan Metode**

**2.1. Material**

Membran UF komersial berbasis polisulfon disuplai oleh CV. GDP Filter, bandung, dengan luas permukaan total sebesar 0,58 m<sup>2</sup>. Membran *hollow fiber* disusun dalam modul berdiameter 2 in (0,0508 m) dan panjang modul sebesar 25 cm (0,25 m). Membran UF hollow fiber memiliki ukuran pori rata-rata sebesar 20 kDa. Sampel air sumur diperoleh dari salah satu perumahan yang berada di Kelurahan Melong, Kecamatan Cimahi Selatan, Kota Cimahi. Kandungan senyawa kimia yang melebihi ambang batas standar baku mutu air minum pada air sumur tersebut ditunjukkan pada Tabel 1. Karbon aktif yang digunakan adalah Calgon Carbsorb 30, yang ditempatkan dalam modul berbentuk silinder berukuran 10 in dan disuplai oleh produsen lokal. Karbon aktif jenis ini memiliki luas permukaan sebesar 870 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>, densitas 0,533 g.cc<sup>-1</sup>, dan total volume pori sebesar 44,9 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup>. Resin penukar kation (Nanotec OCB Resin Lewatit, diameter modul 10 in) dan filter pasir (yang telah diaktifkan dengan KMnO<sub>4</sub>, diameter modul 10 in) juga diperoleh dari produsen lokal tanpa ada perlakuan khusus.

Tabel 1. Kandungan Senyawa Kimia dalam Umpan Air Sumur yang Melebihi Ambang Batas Standar Baku Mutu Air Minum.

No	Parameter	Satuan	Hasil Pengujian
1	Kekeruhan	NTU	10,5
2	Total besi (Fe)	mg.L <sup>-1</sup>	1,71
3	Mangan total (Mn)	mg.L <sup>-1</sup>	0,545

Keterangan: Baku mutu mengacu kepada standard air minum No. 492/MENKES/PER/IV/2010.

**2.2. Pengolahan Air Sumur dengan Unit Terintegrasi UF-KA, UF-SF, dan UF-KA-IE**

Umpan air sumur digunakan tanpa pengolahan lebih lanjut. Unit membran UF dioperasikan secara *crossflow* pada tekanan operasi tetap 1 bar. Unit pengolahan air terintegrasi UF-KA, UF-SF, dan UF-KA-IE ditunjukkan pada Gambar 1. Penggunaan membran UF bertujuan untuk merejeksi kontaminan seperti partikulat, bakteri hingga virus yang terkandung dalam air umpan. Pada konsep pengolahan yang pertama (UF-KA), air produk UF dialirkan menuju KA atau manganese filter pada laju alir tetap (Gambar 1a). Produk air ditampung dalam botol sampel, untuk selanjutnya diuji berdasarkan pada standard baku air minum No. 492/MENKES/PER/IV/2010. Pengujian kualitas air dilakukan berdasarkan metode standard untuk Pemeriksaan Air dan Air Limbah (APHA), di Laboratorium Kualitas Air ITB. Sedangkan pada konsep kedua, produk UF tidak hanya difiltrasi lebih lanjut menggunakan KA namun juga dengan IE (Gambar 1b).



Gambar 1. Rangkaian unit pengolahan air sumur: (a) UF-KA atau SF dan (b) UF-KA-IE

**2.3. Pengujian Fluks Permeat dan Rejeksi Membran UF**

Kinerja membran diuji berdasarkan dua parameter, yaitu fluks dan selektivitas membran. Fluks air murni diuji dengan mengukur volume permeat per satuan waktu per luasan membran pada tekanan 1 bar dengan sistem aliran *crossflow*. Adapun persamaan perhitungan fluks air murni adalah sebagai berikut (Wenten *dkk.*, 2020):

$$J = \frac{V}{A \cdot t} \tag{1}$$

Pengamatan terhadap perubahan fluks diamati selama 2 jam waktu operasi, Pengukuran fluks dilakukan setiap 20 menit.

Rejeksi membran UF (*R*) dihitung menggunakan persamaan (2), dengan membandingkan konsentrasi kontaminan di produk (*C<sub>p</sub>*) dan umpan (*C<sub>f</sub>*).

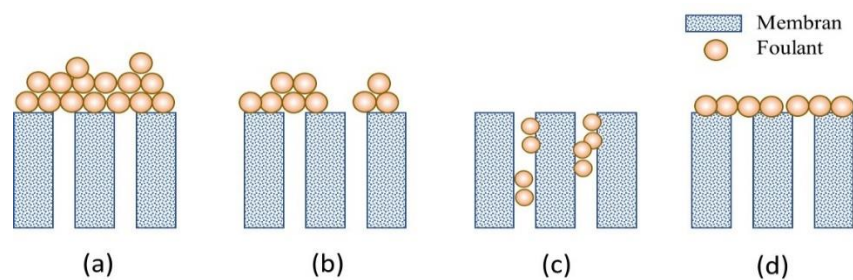
$$R(\%) = \left(1 - \left(C_p/C_f\right)\right) \times 100\% \quad (2)$$

## 2.4. Analisa Fouling Membran

Analisa *fouling* dilakukan berdasarkan studi yang telah dilakukan sebelumnya (Ariono, D dkk., 2018; Wenten dkk., 2019). Mekanisme *fouling* yang terjadi selama proses ultrafiltrasi air sumur dianalisis menggunakan model Hermia, yang ditunjukkan pada Persamaan (2) sampai (4). Konstanta *fouling* ditentukan berdasarkan pengukuran fluks permeat yang selanjutnya digunakan untuk memprediksi fluks permeat selama waktu operasi 500 menit. Data model yang memiliki nilai  $R^2$  tertinggi didefinisikan sebagai *fouling* dominan yang terbentuk pada membran UF. Persamaan linear untuk pemodelan *fouling* dijelaskan pada Tabel 2. Adapun definisi masing-masing *fouling* pada struktur membran ditunjukkan pada Gambar 2 (Wenten dkk., 2019).

Tabel 2. Persamaan Linier untuk Analisis *Fouling* Selama Pengolahan Air Sumur (Wenten dkk., 2019).

Kode	Mekanisme <i>fouling</i>	Persamaan linear	Persamaan no.
Model 1	Lapisan Cake (kode: ci)	$\frac{1}{J^2} = \frac{1}{J_o^2} + K_{cf}t$	(3)
Model 2	<i>Penyumbatan sebagian</i> (kode: ib)	$\frac{1}{J} = \frac{1}{J_o} + K_{ib}A t$	(4)
Model 3	<i>Penyumbatan standard</i> (code: sb)	$\frac{1}{J^{1/2}} = \frac{1}{J_o^{1/2}} + K_{sb}t$	(5)
Model 4	<i>Penyumbatan total</i> (code: cb)	$\ln(J) = \ln(J_o) + K_{cb}t$	(6)



Gambar 2. Mekanisme *Fouling* pada Struktur Membran: (a) Lapisan Cake; (b) Penyumbatan Sebagian; (c) Penyumbatan Standar; (d) Penyumbatan Sempurna

## 3. Hasil dan Pembahasan

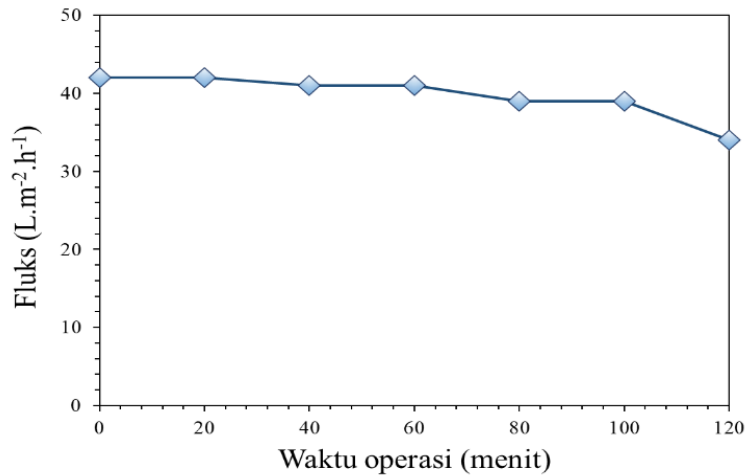
### 3.1. Fluks Air Bersih Membran Ultrafiltrasi (UF)

Hasil pengukuran fluks permeat membran UF berbasis polisulfon ditunjukkan pada Gambar 3. Dapat dilihat bahwa fluks permeat awal adalah sebesar  $42 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ . Setelah dioperasikan selama dua (2) jam, fluks permeat menurun hingga  $34 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  (Gambar 3a). Sementara itu, penurunan fluks akibat *fouling* dalam struktur membran diamati dengan membandingkan fluks permeat pada waktu tertentu dengan fluks awal membran ( $J/J_o$ ). Penurunan fluks permeat selama dua jam waktu operasi hanya sebesar 19%. Pada umumnya, akumulasi kontaminan air di permukaan membran, atau *fouling*, dapat terjadi secara cepat di awal proses ultrafiltrasi (Yin dkk., 2020). Penurunan fluks awal pada membran dapat diakibatkan oleh adanya *fouling* senyawa organik dalam air sumur yang mudah teradsorpsi di permukaan membran polisulfon karena interaksi hidrofobik (Ariono, D. dkk., 2018). Adanya gaya dorong tekanan dari pompa menyebabkan interaksi kontaminan terjadi lebih cepat dan terakumulasi di permukaan membran sehingga membentuk *fouling*. Namun *fouling* pada membran (*foulant*) masih bersifat *reversible* dan mudah tersapu oleh aliran *cross-flow* pada sistem membran. Hal ini ditunjukkan oleh rendahnya penurunan fluks selama 2 jam proses ultrafiltrasi.

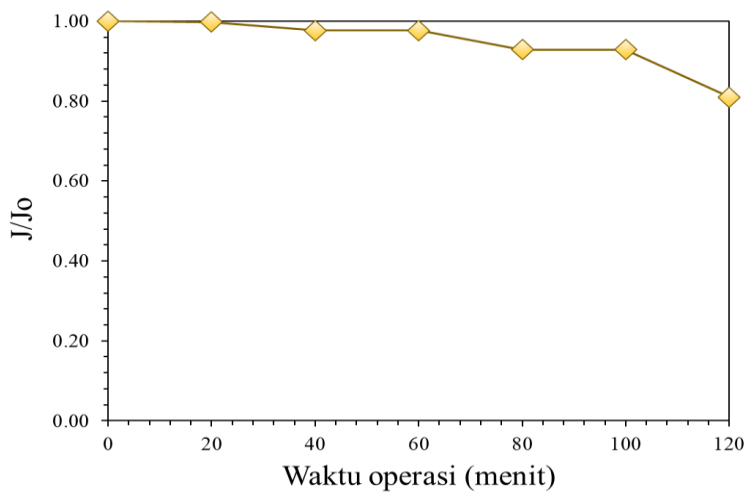
### 3.2. Analisis *Fouling* Dominan pada Membran UF Selama Ultrafiltrasi Air Sumur

Prediksi pembentukan *fouling* dan fluks permeat yang dihasilkan oleh membran UF dihitung untuk waktu operasi 500 menit (Gambar 4). Fluks permeat ( $J$ ) dari hasil perhitungan pada persamaan persamaan linier (3) sampai (6) di plot terhadap waktu. Nilai  $R^2$  untuk masing-masing fluks dalam yang dihitung dari persamaan Tabel 1 ditunjukkan pada Gambar 5. Nilai  $R^2$  tertinggi adalah sebesar 0,8989 yang dimiliki oleh persamaan *fouling* model 4 (*penyumbatan total*) yang diikuti oleh nilai  $R^2$  pada model 3 yaitu 0,8952 (*penyumbatan standard*). Hal ini menunjukkan bahwa kedua *fouling* tersebut dapat terjadi secara simultan selama proses ultrafiltrasi air sumur. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa *fouling* di permukaan membran dapat disapu oleh gaya geser yang diciptakan oleh aliran *cross-*

*flow* sehingga penurunan fluks akibat *fouling* tidak terlalu tajam. Prediksi fluks yang dihasilkan pada 500 menit waktu ultrafiltrasi adalah sekitar  $25 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  atau terjadi penurunan sebesar 40,5% dari fluks awal. Pembersihan membran dapat dilakukan pada penurunan fluks di sekitar 25% atau apabila kualitas air sudah mencapai di bawah kualitas standard baku mutu air minum. Pencegahan *fouling* pada membran dapat dilakukan dengan cara pembersihan secara berkala menggunakan metode *backwash* (aliran balik) atau *flushing*, baik menggunakan produk air atau penambahan bahan kimia (Ding *dkk.*, 2020; Urbanowska & Kabsch-Korbutowicz, 2018; Zhang & Fu, 2018).

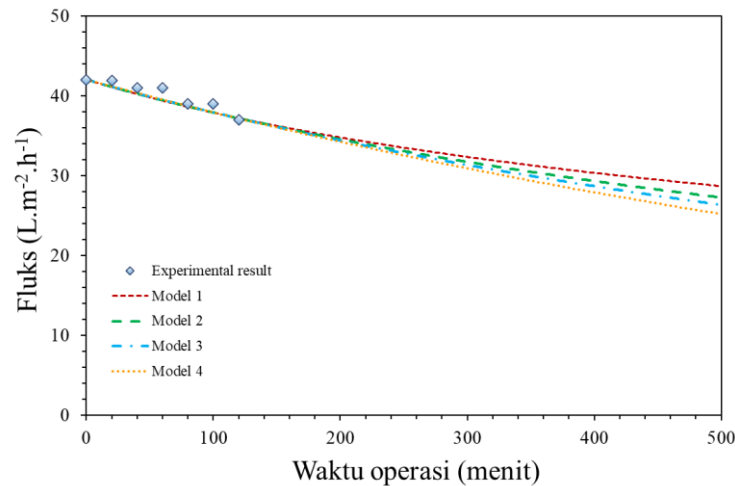


(a)

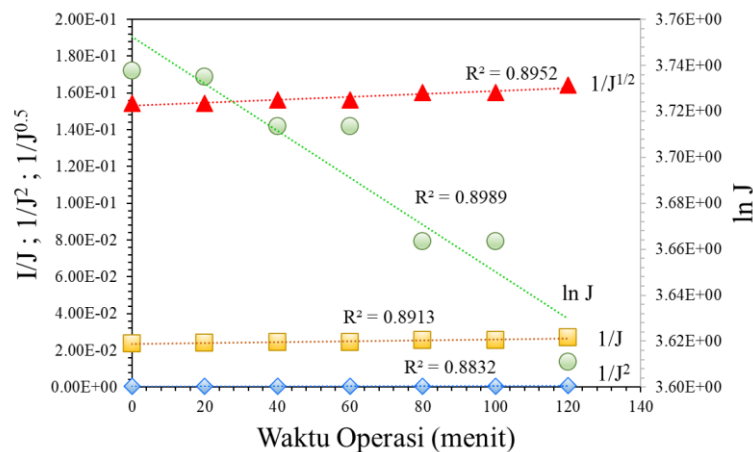


(b)

Gambar 3. Fluks Permeat Membran *hollow fiber* Berbasis PSf pada Tekanan Operasi Tetap Sebesar 1 bar: (a) Profil Fluks Permeat dan (b) Rasio Fluks Permeat Terhadap Fluks Awal Membran ( $J/J_0$ )



Gambar 4. Model *Fouling* pada Membran UF Selama Waktu Operasi 500 Menit dan Tekanan Tetap 1 bar



Gambar 5. Nilai R<sup>2</sup> Model Hermia untuk Setiap Mekanisme *Fouling* pada Membran UF

### 3.3. Performa Unit Integrasi UF-KA, UF-SF, dan UF-KA-IE pada Pengolahan Air Sumur Untuk Air Minum

Performa masing-masing unit pengolah air yang digunakan untuk mengolah air sumur menjadi air minum ditunjukkan pada Tabel 3. Dapat dilihat bahwa konfigurasi yang memenuhi standar baku mutu air minum adalah UF-KA-IE. Sementara itu, unit terintegrasi UF-KA dan UF-IE masih menghasilkan kandungan mangan (Mn) yang melebihi standar baku mutu air minum. Kemampuan penyisihan dari masing-masing konfigurasi setelah 2 jam (120 menit) proses penyaringan diperlihatkan pada Gambar 6. Dapat dilihat bahwa unit UF-KA mampu menyisihkan kekeruhan, mangan, dan besi masing-masing sebesar 95%, 74%, dan 72%. Sementara itu, unit UF-SF mampu menyisihkan kekeruhan sebesar 91%, mangan sebesar 73% dan besi sebesar 52%. Penyisihan oleh unit UF-KA-IE lebih tinggi, yaitu masing-masing sebesar 95.9%, 99.9%, dan 72.5%. Secara keseluruhan, penyisihan tertinggi adalah pada penyisihan kekeruhan air (>90%). Penyisihan kekeruhan lebih didominasi oleh peran membran UF. Ukuran pori membran UF yang sangat kecil mampu menyisihkan partikulat, koloid, bakteri, bahkan virus. Kekeruhan pada produk air untuk ketiga konfigurasi adalah di bawah 0,5 NTU.

Tabel 3. Kualitas Produk Air Setelah Proses Pengolahan

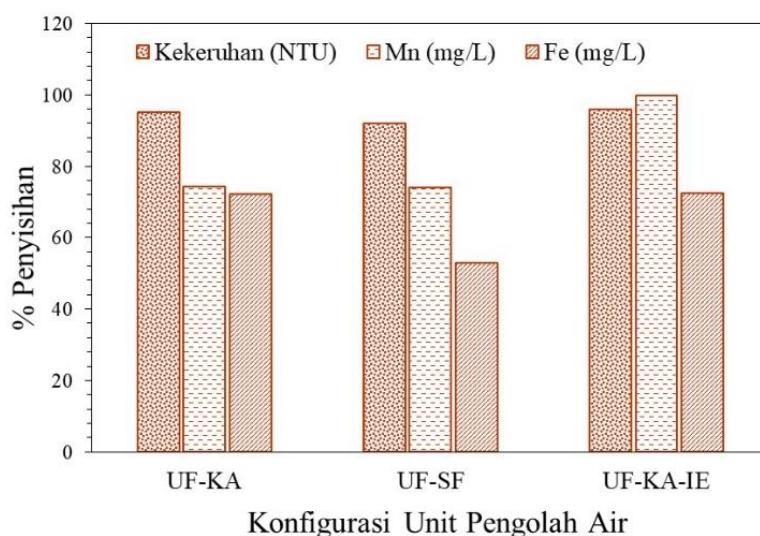
Parameter analisis	Satuan	Baku Mutu	Umpan	UF-KA	UF-SF	UF-KA-IE
kekeruhan	NTU	5	10,5	0,5	0,85	0,427
Mn	mg.L <sup>-1</sup>	0,4	1,71	0,441	0,445	0,001
Fe	mg.L <sup>-1</sup>	0,3	0,545	0,152	0,257	0,15

Efektifitas penyerapan karbon aktif terhadap senyawa logam dalam air dipengaruhi oleh laju alir dan juga daya serap karbon aktif terhadap senyawa logam. Laju alir umpan melewati karbon aktif, yaitu efluen UF sebesar 34 - 42 L.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>, berdampak pada waktu kontak antara umpan dan partikel. Interaksi senyawa logam dan karbon aktif yang



lemah oleh Gaya Van der Waals dapat menyebabkan lepasnya interaksi oleh adanya laju alir yang tinggi. Selain itu, konsentrasi mangan yang cukup tinggi melalui karbon aktif, memungkinkan adanya senyawa yang lolos dari karbon aktif menuju aliran produk. Fenomena yang hampir sama terjadi pada unit UF-SF, dimana unit SF belum mampu menyisihkan mangan secara baik, sehingga konsentrasi senyawa tersebut masih di atas standar syarat kualitas air minum. Untuk meningkatkan performa penyisihan dengan menggunakan *post-treatment* KA dan SF, maka perlu volume KA atau SF yang lebih besar dari yang telah digunakan saat ini.

Dalam penelitian ini, unit IE ditambahkan setelah proses UF-KA untuk meningkatkan kualitas produk air. Unit IE dalam penelitian ini menggunakan resin penukar kation yang selektif terhadap ion-ion bermuatan positif, seperti besi dan mangan. Karena selektifitas yang tinggi maka besi, mangan, atau ion-ion bivalen positif yang masih lolos dari unit KA akan dengan mudah teradsorpsi oleh resin dan terjadi pertukaran ion dengan gugus positif yang ada dalam resin. Hasil analisis keseluruhan produk air dari unit terintegrasi UF-KA-IE ditunjukkan pada Tabel 4. Dapat dilihat bahwa produk air telah memenuhi standar baku untuk air minum, sehingga dapat dikonsumsi untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari bahkan untuk minum.



Gambar 6. Kemampuan Penyisihan Senyawa Terlarut dalam Air Sumur

Tabel 4. Kualitas produk air hasil pengolahan dengan unit UF-KA-IE

Parameter		Standar Maksimum	Hasil Pengujian
<b>Parameter Fisik</b>			
1	Bau	-	Tidak berbau
2	Zat padat terlarut (TDS)	500 mg.L <sup>-1</sup>	414 mg.L <sup>-1</sup>
3	Kekeruhan	5 NTU	0,427 NTU
4	Rasa	-	Tidak berasa
5	Warna	15 Pt.Co	5 Pt.Co
<b>Parameter Kimia</b>			
1	Zat Organik (KMnO <sub>4</sub> )	10 mg.L <sup>-1</sup>	5,65 mg.L <sup>-1</sup>
2	Besi (Fe)	0,3 mg.L <sup>-1</sup>	< 0,01 mg.L <sup>-1</sup>
3	Flourida (F)	1,5 mg.L <sup>-1</sup>	0,454 mg.L <sup>-1</sup>
4	Kesadahan (CaCO <sub>3</sub> )	500 mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>	0,0 mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>
5	Klorida (Cl)	250 mg.L <sup>-1</sup>	34,7 mg.L <sup>-1</sup>
6	Mangan (Mn)	0,4 mg.L <sup>-1</sup>	< 0,05 mg.L <sup>-1</sup>
7	Natrium (Na)	200 mg.L <sup>-1</sup>	153 mg.L <sup>-1</sup>
8	Nitrat (NO <sub>3</sub> )	50 mg.L <sup>-1</sup>	0,576 mg.L <sup>-1</sup>
9	Nitrit (NO <sub>2</sub> )	3 mg.L <sup>-1</sup>	0,061 mg.L <sup>-1</sup>
10	pH	6,5-8,5	7,95
11	Sulfat (SO <sub>4</sub> )	250 mg.L <sup>-1</sup>	44,9 mg.L <sup>-1</sup>
12	Kalium (K)	-	0,762 mg.L <sup>-1</sup>
13	Keasamaan pp	-	3,84 mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>
14	Kelindian mo	-	204 mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub>
15	Daya hantar listrik	-	690 μS.cm <sup>-1</sup>

(Tempat pengujian : Laboratorium Kualitas Air Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan-ITB)

## Kesimpulan

Unit Membran UF telah diintegrasikan dengan unit karbon aktif dan resin penukar ion untuk pengolahan air sumur menjadi air minum. Pengaruh konfigurasi unit *post-treatment* untuk UF dipelajari lebih lanjut terhadap kualitas produk air yang dihasilkan. Hasil uji membran pada pengolahan air sumur menunjukkan bahwa membran memiliki fluks permeat sebesar  $42 \text{ L.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ . Selama 2 (dua) jam proses filtrasi, penurunan fluks permeat hanya sebesar 19% yang disebabkan oleh *fouling* di permukaan membran. Hasil analisa menggunakan model Hermia menunjukkan bahwa *fouling* yang terbentuk didominasi oleh *fouling* total dan standard dengan nilai  $R^2$  masing-masing sebesar 0,8989 dan 0,8952. Berdasarkan data hasil analisa produk air, unit UF-KA mampu menurunkan kesadahan, zat organik, zat besi, dan kontaminan lainnya hingga di bawah nilai ambang batas kontaminan untuk standar baku mutu air minum. Namun konsentrasi senyawa mangan masih di atas ambang batas standar ( $>0,4 \text{ mg/L}$ ). Dengan penambahan unit IE setelah proses UF-KA, produk air yang dihasilkan memenuhi standar baku mutu air minum sesuai peraturan. Penyisihan turbiditas, besi, dan mangan untuk unit UF-KA-IE adalah masing-masing sebesar 95,9%; 99,9%; dan 72,5%. Unit membran UF berbasis polisulfon (PSf) yang terintegrasi karbon aktif dan resin penukar ion dapat dijadikan sebagai solusi pemenuhan kebutuhan air layak konsumsi bagi masyarakat, terutama untuk daerah yang belum terjangkau sarana PDAM.

## Ucapan Terima Kasih

Kegiatan ini didanai oleh LPPM Universitas Jenderal Achmad Yani melalui pendanaan Hibah Kompetitif Hibah Penelitian Internal Kompetitif Unjani Tahun 2021. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Dinas Perdagangan, Koperasi, Usaha Kecil dan Menengah, Dan Perindustrian (Disdagkoperin) pemerintah Kota Cimahi dan masyarakat Perumahan Pharmindo, Cimahi Selatan atas dukungannya dalam kegiatan penelitian ini.

## Daftar Notasi

- $J$  = fluks air ( $\text{L.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ )  
 $J_o$  = fluks awal pada  $t = 0 \text{ min.}$  ( $\text{L.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ )  
 $V$  = volume permeat (L),  
 $A$  = luas permukaan kontak membran ( $\text{m}^2$ )  
 $t$  = waktu operasi (jam atau h).  
 $K$  = parameter *fouling*.

## Daftar Pustaka

- Abe, M. (2018). Oxides and hydrous oxides of multivalent metals as inorganic ion exchangers. In *Inorganic ion exchange materials*. (Mitsuo Abe, Eds) (pp. 161-274): CRC press, USA.
- Ariono, D., Aryanti, P. T. P., Wardani, A. K., & Wenten, I. G. (2018). Fouling characteristics of humic substances on tight polysulfone-based ultrafiltration membrane. *Membrane Water Treatment*, 9(5), 353-361. doi:<https://doi.org/10.12989/mwt.2018.9.5.353>
- Ariono, D., Wardani, A. K., Widodo, S., Aryanti, P. T. P., & Wenten, I. G. (2018). Fouling mechanism in ultrafiltration of vegetable oil. *Materials Research Express*, 5(3), 034009. doi:<https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab69f>
- Aryanti, P. T. P., Joscariita, S. R., Wardani, A. K., Subagjo, S., Ariono, D., & Wenten, I. G. (2016). The Influence of PEG400 and Acetone on Polysulfone Membrane Morphology and Fouling Behaviour. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 48(2), 135-149. doi:<https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2016.48.2.1>
- Aryanti, P. T. P., Mukhaimin, I., Shiddiqi, Q. Y. A., & Triyastuti, M. S. T. (2020a). Instalasi Unit Ultrafiltrasi untuk Penyediaan Air Minum di Kota Cimahi. *Jurnal Abdimas Kartika Wijayakusuma*, 1(1), 20-27.
- Aryanti, P. T. P., Nugroho, F. A., & Susilowati. (2020b). Unit Terintegrasi Elektrokoagulasi dan Ultrafiltrasi untuk Pengolahan Limbah Cair Tempe di Kelurahan Cimahi, Kecamatan Cimahi Tengah. *WIDYA LAKSANA*, 9(2), 176-182.
- Aryanti, P. T. P., Subagjo, S., Ariono, D., & Wenten, I. G. (2015). Fouling and rejection characteristic of humic substances in polysulfone ultrafiltration membrane. *Journal of Membrane Science and Research*, 1, 41-45. doi:10.22079/JMSR.2015.12305
- Baker, R. W. (2012). *Membrane technology and applications*: John Wiley & Sons, USA.
- Chen, Y., Xu, W., Zhu, H., Wei, D., He, F., Wang, D., Du, B., & Wei, Q. (2019). Effect of turbidity on micropollutant removal and membrane fouling by MIEX/ultrafiltration hybrid process. *Chemosphere*, 216, 488-498. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.148>
- Cheng, L.-H., Xiong, Z.-Z., Cai, S., Li, D.-W., & Xu, X.-H. (2020). Aeration-manganese sand filter-ultrafiltration to remove iron and manganese from water: Oxidation effect and fouling behavior of manganese sand coated film. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101621.

- Cheng, X., Li, P., Zhou, W., Wu, D., Luo, C., Liu, W., Ren, Z., & Liang, H. (2019). Effect of peroxymonosulfate oxidation activated by powdered activated carbon for mitigating ultrafiltration membrane fouling caused by different natural organic matter fractions. *Chemosphere*, *221*, 812-823.
- Delgado, N., Capparelli, A., Navarro, A., & Marino, D. (2019). Pharmaceutical emerging pollutants removal from water using powdered activated carbon: study of kinetics and adsorption equilibrium. *Journal of Environmental Management*, *236*, 301-308.
- Ding, J., Wang, S., Xie, P., Zou, Y., Wan, Y., Chen, Y., & Wiesner, M. R. (2020). Chemical cleaning of algae-fouled ultrafiltration (UF) membrane by sodium hypochlorite (NaClO): characterization of membrane and formation of halogenated by-products. *Journal of Membrane Science*, *598*, 117662.
- Gozali, G., Kusuma, B. J., & Mulyanto, S. (2020). Penerapan Teknologi Pengolahan Dan Peningkatan Distribusi Air Bersih Di Lingkungan Masyarakat RT 36 Kelurahan Graha Indah. *Jurnal Karya Abdi Masyarakat*, *4*(3), 660-666.
- Guo, Y., Bai, L., Tang, X., Huang, Q., Xie, B., Wang, T., Wang, J., Li, G., & Liang, H. (2018). Coupling continuous sand filtration to ultrafiltration for drinking water treatment: Improved performance and membrane fouling control. *Journal of Membrane Science*, *567*, 18-27.
- Keskitalo, T., Tanskanen, J., & Kuokkanen, T. (2007). Analysis of key patents of the regeneration of acidic cupric chloride etchant waste and tin stripping waste. *Resources, conservation and recycling*, *49*(3), 217-243.
- Mande, A., Kavathekar, B., Langade, A., Lasankute, N., & Patle, S. (2018). Low Cost Household Water Treatment Systems: A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, ISSN, 2278-0181.
- Oka, P., Khadem, N., & Bérubé, P. (2017). Operation of passive membrane systems for drinking water treatment. *Water Research*, *115*, 287-296.
- Rangreez, T. A., & Asiri, A. M. (2019). *Applications of Ion Exchange Materials in Chemical and Food Industries*: Springer.
- Ranjan, P., & Prem, M. (2018). Schmutzdecke-a filtration layer of slow sand filter. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *7*(07), 637-645.
- Said, N. I. (2007). Pengolahan Air Minum dengan Karbon Aktif Bubuk Prinsip Dasar Perhitungan, Perencanaan Sistem Pembubuhan dan Kriteria Disain. *Jurnal Air Indonesia*, *3*(2).
- Silva, B., Costa, F., Neves, I. C., & Tavares, T. (2015). Removal of Psychiatric Drugs in Water Treatment Systems. In *Psychiatric Pharmaceuticals as Emerging Contaminants in Wastewater* (pp. 47-71): Springer.
- Tagliavini, M., Weidler, P. G., Njel, C., Pohl, J., Richter, D., & Schüfer, A. I. (2020). Polymer-based spherical activated carbon-ultrafiltration (UF-PBSAC) for the adsorption of steroid hormones from water: material characteristics and process configuration. *Water Research*, *185*, 116249.
- Urbanowska, A., & Kabsch-Korbutowicz, M. (2018). The application of nanofiltration in NaOH solution regeneration after ultrafiltration membrane cleaning. *Desalination and Water Treatment*, *128*, 70-78.
- Wenten, I. G., Ariono, D., Purwasasmita, M., & Khoirudin. (2017). *Integrated processes for desalination and salt production: A mini-review*. Paper presented at the AIP Conference Proceedings, 1818, 020065 (2017).
- Wenten, I. G., Aryanti, P. T. P., Khoiruddin, K., Hakim, A. N., & Himma, N. F. (2016). Advances in polysulfone-based membranes for hemodialysis. *Journal of Membrane Science and Research*, *2*(2), 78-89. doi:10.22079/JMSR.2016.19155
- Wenten, I. G., Khoiruddin, K., Wardani, A. K., Aryanti, P. T. P., Astuti, D. I., & Komaladewi, A. A. I. A. S. (2020). Preparation of antifouling polypropylene/ZnO composite hollow fiber membrane by dip-coating method for peat water treatment. *Journal of Water Process Engineering*, *34*, 101158. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101158>
- Wenten, I. G., Victoria, A. V., Tanukusuma, G., Khoiruddin, K., & Zunita, M. (2019). Simultaneous clarification and dehydration of crude palm oil using superhydrophobic polypropylene membrane. *Journal of Food Engineering*, *248*, 23-27.
- Xu, D., Bai, L., Tang, X., Niu, D., Luo, X., Zhu, X., Li, G., & Liang, H. (2019). A comparison study of sand filtration and ultrafiltration in drinking water treatment: Removal of organic foulants and disinfection by-product formation. *Science of the Total Environment*, *691*, 322-331.
- Yin, Z., Ma, Y., Tanis-Kanbur, B., & Chew, J. W. (2020). Fouling behavior of colloidal particles in organic solvent ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*, *599*, 117836. doi:<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.117836>
- Yu, H., Huang, W., Liu, H., Li, T., Chi, N., Chu, H., & Dong, B. (2021). Application of Coagulation-Membrane Rotation to Improve Ultrafiltration Performance in Drinking Water Treatment. *Membranes*, *11*(8), 643.
- Yu, H., Li, X., Chang, H., Zhou, Z., Zhang, T., Yang, Y., Li, G., Ji, H., Cai, C., & Liang, H. (2020). Performance of hollow fiber ultrafiltration membrane in a full-scale drinking water treatment plant in China: a systematic evaluation during 7-year operation. *Journal of Membrane Science*, *613*, 118469.

- Yu, W., Liu, M., & Graham, N. J. (2019). Combining magnetic ion exchange media and microsand before coagulation as pretreatment for submerged ultrafiltration: Biopolymers and small molecular weight organic matter. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(22), 18566-18573.
- Yusuf, K., Sadiku, I., Yusuff, S., & Bukoye, S. (2021). Effect of granular activated carbon particle sizes and depths in slow sand filter on water purification. *Nigerian Journal of Pure and Applied Sciences*, 34(1), 3881-3891.
- Zeman, L. J., & Zydney, A. L. (1996). *Microfiltration and ultrafiltration: principles and applications*: M. Dekker.
- Zhang, Y., & Fu, Q. (2018). Algal fouling of microfiltration and ultrafiltration membranes and control strategies: A review. *Separation and Purification Technology*, 203, 193-208.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.04.040>
- Zhang, Y., Wang, X., Jia, H., Fu, B., Xu, R., & Fu, Q. (2019). Algal fouling and extracellular organic matter removal in powdered activated carbon-submerged hollow fiber ultrafiltration membrane systems. *Science of the Total Environment*, 671, 351-361.

## Pendekatan Metode ABC Pada Toko X untuk Pengendalian Persediaan Barang

Ermayana Megawati<sup>1</sup>, Jihan Pradesi<sup>2</sup>, Dewi Zainul Khabibah<sup>3</sup>, dan Firman Ardiansyah Ekoanindiyo<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik dan Rekayasa, Universitas Selamat Sri, Kendal, Indonesia

<sup>4</sup> Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Stikubank, Semarang, Indonesia

<sup>1</sup>[ermayana1802@gmail.com](mailto:ermayana1802@gmail.com), <sup>2</sup>[jihan.pradesi@yahoo.com](mailto:jihan.pradesi@yahoo.com), <sup>3</sup>[dewizainul.32@gmail.com](mailto:dewizainul.32@gmail.com), <sup>4</sup>[firman@edu.unisbank.ac.id](mailto:firman@edu.unisbank.ac.id)

### Abstrak

Persaingan industri retail begitu ketat, salah satunya yaitu dengan efisiensi biaya, yang dapat dilakukan dengan mengendalikan persediaan. Toko X merupakan salah satu toko retail modern yang ada di Indonesia. Toko X menjual berbagai macam jenis barang fast moving consumer goods (FMCG). Perusahaan menerapkan sistem *make to stock* untuk memenuhi permintaan konsumen. Jumlah persediaan barang di gudang, tidak sesuai dengan permintaan konsumen sehingga terjadi penumpukan barang di gudang yang mengakibatkan tingginya biaya persediaan. Selain itu beberapa barang yang dijual mempunyai stok menipis, padahal permintaan konsumen banyak. Kondisi seperti ini akan mengakibatkan kerugian bagi perusahaan. Kategori A 30% jumlah barang sebesar Rp. 38.235.557,-. Klasifikasi B 20% jumlah barang senilai Rp. 7.748.157,-. Kategori C 50%. nilai Rp. 4.552.842,-. Pemesanan ekonomis pada toko X, untuk persediaan barang A yaitu air mineral A PET 600 ml, pemesanan dilakukan saat persediaan 7 pcs, persediaan pengaman 46 pcs. Air mineral A PET 1500 ML pemesanan persediaan 7 pcs, persediaan pengaman 52 pcs. Susu bear brand 12 ml dengan pemesanan saat persediaan 11 pcs, persediaan pengaman 39 pcs.

Kata kunci: persediaan barang, metode ABC, pemesanan ekonomis (ROP).

### Abstract

Retail industry competition is so tight, one of which is cost efficiency, which can be done by controlling inventory. Store X is one of the modern retail stores in Indonesia. Store X sells various types of fast-moving consumer goods (FMCG). The company implements a *make to stock* system to meet consumer demand. The amount of inventory in the warehouse is not in accordance with consumer demand so that there is a buildup of goods in the warehouse which results in high inventory costs. In addition, some of the goods sold have low stock, even though there is a lot of consumer demand. Conditions like this will result in losses for the company. Category A 30% total goods Rp. 38.235.557,-. Classification B 20% total goods worth Rp. 7.748.157,-. Category C 50%. value of Rp. 4.552.842,-. Economical order at shop X, for stock of item A, namely mineral water A PET 600 ml, the order is made when stock is 7 pcs, safety stock is 46 pcs. Mineral water A PET 1500 ML ordering supplies 7 pcs, safety supplies 52 pcs. Bear brand milk 12 ml with order when stock is 11 pcs, safety stock 39 pcs.

Keywords: product inventory, ABC method, ReOrder Point (ROP)

### 1. Pendahuluan

Persaingan industri retail begitu ketat, salah satunya yaitu dengan efisiensi biaya, yang dapat dilakukan dengan mengendalikan persediaan. Toko X merupakan salah satu toko retail modern yang ada di Indonesia. Cabangnya ada di seluruh Indonesia. Toko X menjual berbagai macam jenis barang *fast moving consumer goods* (FMCG) seperti produk makanan kemasan, minuman kemasan, obat – obatan serta kebutuhan rumah pribadi. Sasaran utama dari Toko X *end consumer* yang merupakan pelanggan untuk membeli kebutuhan sendiri. Perusahaan menerapkan sistem *make to stock* untuk memenuhi permintaan konsumen. Perusahaan mempunyai nilai target *inventory*, tetapi dalam pelaksanaannya nilai *inventory* sering kali mempunyai nilai di atas target maksimal perusahaan. Pada gudang jumlah persediaan barang tidak sesuai dengan permintaan konsumen sehingga terjadi penumpukan barang di gudang yang mengakibatkan tingginya biaya persediaan. Selain itu beberapa barang yang dijual mempunyai stok menipis, padahal permintaan konsumen banyak. Kondisi seperti ini akan mengakibatkan kerugian bagi perusahaan.

Fatma, Stefania (2013), mengalokasikan biaya aktivitas bisa secara tepat dilakukan berdasarkan konsumsi masing masing aktivitas dengan menggunakan *Activity Based Costing system*. Skala prioritas dibuat serta persediaan bahan baku diperbaiki berdasarkan kelas A, B, dan C maka *over stock* dapat berkurang menjadi 12% (Afianti, 2017). Chatisa, Ivan.; Muslim, Istianah.; Sari, Rika Perdana. (2019), metode ABC dapat dipergunakan untuk mengelompokkan barang ke dalam kelas-kelas tertentu berdasarkan permintaan tahunan dari barang tersebut. Penggunaan klasifikasi ABC untuk mengelompokkan suku cadang yang masuk dalam kategori kritis (Guslan D, Saputra I, 2020). Perusahaan yang tidak memiliki persediaan, akan menanggung resiko serta permintaan konsumen tidak dapat dipenuhi (Sofia E, Otik Wiraswati M, Agustya Ningrum D, dkk, 2020). Hidayat, Dian F.; Sutaarga, Okta.; Fakhrurozi, Akhmad (2019), analisis ABC

#### Info Makalah:

Dikirim : 02-18-21;

Revisi 1 : 04-11-21;

Revisi 2 : 06-08-21;

Revisi 3 : 10-03-21;

Revisi 4 : 11-23-21;

Diterima : 11-25-21.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +62-852-25040025

e-mail : [firman@edu.unisbank.ac.id](mailto:firman@edu.unisbank.ac.id)

pada manajemen persediaan diperlukan untuk mengontrol sejumlah persediaan dengan memperhitungkan nilai investasi.

Pendekatan metode ABC dapat mengetahui investasi bahan baku dengan nilai tertinggi, sedang serta terendah. Selain itu juga untuk mengetahui perputaran bahan baku berdasar pemakaian bahan baku (Junaidi, 2019). Wulandari, Siska.; Sugiarto (2019), ABC VEN mempunyai kontribusi untuk pengelolaan pengeluaran di Rumah Sakit yang tidak efisien dan terorganisir. Dengan pendekatan ABC VEN (*Vital, Esensial, dan Non esensial*) dapat meningkatkan pengelolaan obat di rumah sakit menjadi lebih efisien dan efektif. Kombinasi antara metode ABC dan VEN dilakukan untuk mengefisienkan atau penyesuaian dana perencanaan obat agar sesuai dengan yang dibutuhkan. (A. Rofiq, O. Oetari, G. Widodo, 2019). Putra, Dewa Gede Putra Narendra.; Purnawati, Ni Ketut (2018), sistem persediaan barang dagangan yang harus dilakukan dengan klasifikasi menggunakan metode ABC. Dengan menggunakan metode *always better control* dapat membantu perusahaan membagi barang ke dalam kelompok A, B, dan C. Pengelompokan barang dapat digunakan perusahaan untuk mengetahui perlakuan setiap kelompoknya (P. Aprilia, S. Dahda, E. Ismiyah, 2020). Noviani, Ricca.; Nasution, Yuki Novia.; Rizki, Arista (2017), analisis ABC merupakan metode pengendalian persediaan untuk mengelola barang dalam jumlah kecil tetapi memiliki utilisasi yang tinggi. Persediaan dikategorikan menjadi tiga kelas yaitu kelas A, B, dan C. Dengan pendekatan metode *always better control* mampu meminimalkan total biaya persediaan tahunan (N.A, F. Pulansari, S. Sunardi, 2018). Ramadhan, Anggitia. (2014), Untuk penentuan jumlah perencanaan obat yang harus dibeli dan pengawasan persediaan obat dalam memantau jumlah persediaan obat dibagian penyimpanan guna mengantisipasi kekurangan stok obat. Untuk menangani permasalahan toko X, hal yang dilakukan terlebih dahulu adalah mengklasifikasikan jenis kategori barang dengan menggunakan analisis ABC. Tingkat kepentingan persediaan dapat diketahui dengan analisis ABC, dimana pengendalian persediaan dilakukan pada persediaan yang memiliki nilai sangat penting.

## 2. Metode

Menurut hukum Pareto, pada analisis ABC barang dapat digolongkan sesuai tingkatan nilai dari nilai yang paling tinggi ke nilai yang paling rendah. Dibagi lagi menjadi kelompok besar terprioritas, kelompok tersebut diberi nama A, B, C .

- Kelas A: jumlah barang dalam jumlah dalam unit 15–20% dari total seluruh barang, representasi 75–80% dari total nilai uang.
- Kelas B: jumlah barang dalam jumlah dalam unit 20–25% dari total seluruh barang, representasi 10–15% dari total nilai uang.
- Kelas C: jumlah barang dalam jumlah dalam unit 60–65% dari total seluruh barang, representasi 5–10% dari total nilai uang.

Urutan pengelompokan barang dalam analisis ABC adalah :

1. Setiap tipe barang ditentukan jumlah unitnya.
2. Setiap tipe barang ditentukan harga setiap unitnya.
3. Total nilai uang dari masing-masing tipe barang dapat ditentukan dengan mengalikan harga setiap unit dengan jumlah unit.
4. Susun urutan tipe barang menurut besarnya total nilai uang, dengan urutan pertama tipe barang dengan total nilai uang paling besar.
5. Banyaknya tipe barang dihitung persentase kumulatifnya.
6. Nilai uang barang dari total nilai uang dihitung persentase kumulatifnya
7. Bentuk kelas-kelas berdasarkan persentase barang dan persentase nilai uang barang.
8. Untuk menunjukkan tingkat kepentingan masalah, digambar kurva analisis ABC (bagian *pareto*).

### Pengelompokkan Produk Dagang Berdasarkan Klasifikasi ABC

Dalam pengelompokkan produk berdasarkan klasifikasi ABC:

- a. Menentukan nilai rata-rata barang dagang per bulan:

$$\text{Rata-rata permintaan bahan baku} \times \text{harga bahan baku} \quad (1)$$

- b. Penentuan jumlah presentase nilai pembelian semua bahan baku

$$\frac{\text{nilai rata-rata bahan baku/ bln}}{\text{total nilai permintaan}} \times 100\% \quad (2)$$

### Perhitungan *Safety Stock*

Untuk menentukan *safety stock* dengan cara:

- a. Perhitungan *safety stock* :

$$SS = \sigma \cdot Z \quad (3)$$

**Perhitungan ReOrder Point**

Untuk mengetahui *reorder point* dapat dilakukan :

$$ROP = AU \times L + SS \quad (4)$$

**3. Hasil dan Pembahasan**

Data harga pembelian barang toko X :

Tabel 1. Harga Pembelian Barang

No.	Description	Harga (Rp.)
1.	Air mineral A PET 600 ml	2.129
2.	Air mineral A PET 1500 ml	3.936
3.	Teh harum 350 ml	2.476
4.	Tolak angin anak 10 ml	2.039
5.	Susu bear 190 ml	7.687
6.	Kentang sapi panggang 80 gr	6.715
7.	Teh melati 350 ML	1.915
8.	Biskuit salut chese 10 gr	5.430
9.	Susu ultra coklat 250 ml	4.368
10.	Mie enak 22 gr	915

Barang yang stok nya berlebih di Toko X periode Januari 2019 – Desember 2019:

Tabel 2. Data Barang *Overstock* Januari – Desember 2019

No.	Description	Minor	Average Sales Qty/Day Retail	OH (On Hand)
1.	Air mineral A PET 600 ml	120	11,5	6.327
2.	Air mineral A PET 1500 ml	36	8,04	8.329
3.	Teh harum 350 ml	24	3,26	2.118
4.	Tolak angin anak 10 ml	2	0,2	268
5.	Susu bear 190 ml	30	2,6	2.638
6.	Kentang sapi panggang 80 gr	2	0,61	562
7.	Teh melati 350 ML	24	3,7	3.624
8.	Biskuit salut chese 10 gr	4	0,05	98
9.	Susu ultra coklat 250 ml	24	3,01	2.677
10.	Mie enak 22 gr	24	0,42	439

Keterangan:

Minor (minimal order): Toko X akan melakukan pemesanan barang jika stok barang sudah berkurang di bawah standar toko. *Average sales quantity/day retail*: penjualan rata – rata suatu item perhari percabang. OH: stok barang periode Januari – Desember 2019. Sedangkan total penjualan tiap barang selama periode Januari 2019 – Desember 2019 dapat dilihat pada tabel:

Tabel 3. Data Penjualan Periode Januari – Desember 2019

No.	Description	Total Penjualan (Pcs) (dalam 1 tahun)
1.	Air mineral A PET 600 ml	4.781
2.	Air mineral A PET 1500 ml	5.269
3.	Teh harum 350 ml	1.191
4.	Tolak angin anak 10 ml	73
5.	Susu bear 190 ml	952
6.	Kentang sapi panggang 80 gr	225
7.	Teh melati 350 ML	1.354
8.	Biskuit salut chese 10 gr	29
9.	Susu ultra coklat 250 ml	1.099
10.	Mie enak 22 gr	156

Data penerimaan barang item *overstock* selama periode Januari 2019 – Desember 2019 :

Tabel 4. Data Penerimaan Barang *Overstock* Periode Januari – Desember 2019

No.	Description	Quantity Pembelian (Pcs)	Receive (Rp.)
1.	Air mineral A PET 600 ml	3192	6.795.768
2.	Air mineral A PET 1500 ml	1368	5.384.448
3.	Teh harum 350 ml	774	1.916.424
4.	Tolak angin anak 10 ml	94	191.618
5.	Susu bear 190 ml	570	4.150.980
6.	Kentang sapi panggang 80 gr	148	993.820
7.	Teh melati 350 ML	300	574.500
8.	Biskuit salut chese 10 gr	100	543.000
9.	Susu ultra coklat 250 ml	354	15.46.272
10.	Mie enak 22 gr	132	120.780

Perhitungan analisis ABC dapat dilakukan sebagai berikut :

1. Nilai rata-rata barang dagang per bulan dapat diperoleh dari rata-rata permintaan bahan baku dikalikan dengan harga bahan baku.
2. Selanjutnya menentukan jumlah presentase nilai pembelian semua bahan baku dengan cara nilai rata-rata bahan baku per bulan di bagi dengan nilai total permintaan.
3. Hitung presentase kumulatif nilai pembelian
4. Kelompokkan persediaan ke dalam kategori A, B, dan C. barang dagang dengan nilai klasifikasi A sebanyak 3 barang dagang dimana presentase kumulatif permintaannya menyerap sekitar 0-80%, klasifikasi barang dagang dengan nilai B didapatkan sebanyak 2 item barang dagang dengan presentase kumulatif permintaan sebesar 81-95%, dan klasifikasi nilai C barang dagang didapatkan sebanyak 3 item barang dagang dengan persentase kumulatif nilai permintaannya dimulai dari 96-100%

Perhitungan pengelompokan barang dagang berdasarkan klasifikasi ABC untuk item:

- Air mineral A PET 600 ml :  $4.781 \times 2.129 = 10.178.749$
- Air mineral A PET 1500 ml :  $3.936 \times 5.269 = 20.738.784$
- Teh harum 350 ml :  $2.476 \times 1.191 = 2.947.725$
- Tolak angin anak 10 ml :  $2.039 \times 73 = 148.847$
- Susu bear 190 ml :  $7.687 \times 952 = 73.180.024$
- Kentang sapi panggang 80 gr :  $6.715 \times 225 = 1.510.875$
- Teh melati 350 ml :  $1.915 \times 1.354 = 2.592.910$
- Biskuit salut chese 10 gr :  $5.430 \times 29 = 157.470$
- Susu ultra coklat 250 ml :  $4.368 \times 1.099 = 4.800.432$
- Mie enak 22 gr :  $915 \times 156 = 142.740$

Dari hasil perhitungan di atas selanjutnya di kelompokkan menjadi tiga kelompok yaitu A, B, dan C seperti dalam tabel:

Tabel 5. Pengelompokkan Barang Berdasarkan Klasifikasi ABC

No.	Description	Total Volume	Persentase Nilai (%)	SUM (%)	ABC
1.	Air mineral A PET 600 ml	20738784	41,03719296	75,65921	A
2.	Air mineral A PET 1500 ml	10178749	20,14135866		A
3.	Susu bear 190 ml	7318024	14,48065436		A
4.	Susu ultra coklat 250 ml	4800432	9,498929844	15,33179	B
5.	Teh harum 350 ml	2947725	5,832856913		B
6.	Teh melati 350 ml	2592910	5,130761186	9,009007	C
7.	Kentang sapi panggang 80 gr	1510875	2,989667519		C
8.	Tolak angin anak 10 ml	148847	0,294533328		C
9.	Mie enak 22gr	142740	0,282449006		C
10.	Biskuit salut chese 10 gr	157470	0,311596224		C
	TOTAL	50536556			

### Perhitungan *Safety Stock*

Langkah dalam mencari *safety stock*:

1. Menentukan permintaan dari tiap item
2. Mencari rata – rata permintaan dalam satu periode
3. Menentukan standar deviasi



Data penjualan toko X selama periode Januari – Desember 2019 :

Tabel 6. Data Penjualan Toko X Selama Periode Januari – Desember 2019 :

No.	Description	Jan	Feb	Maret	April	Mei	Juni	Juli	Agt	Sep	Okt	Nov	Des
1.	Air mineral A PET 600 ml	670	120	237	396	387	651	411	301	201	369	469	569
2.	Air mineral A PET 1500 ml	480	320	211	132	169	578	231	227	267	307	283	597
3.	Teh harum 350 ml	160	73	86	91	79	117	53	69	116	71	67	209
4.	Tolak angin anak 10 ml	15	-	1	-	2	19	5	-	3	7	-	21
5.	Susu bear 190 ml	89	63	79	66	59	119	71	83	78	42	74	129
6.	Kentang sapi panggang 80 gr	21	17	13	7	9	14	37	-	38	27	16	26
7.	Teh melati 350 ML	216	81	64	74	119	63	217	95	81	76	67	201
8.	Biskuit salut chese 10 gr	3	-	4	-	1	-	7	2	5	4	-	3
9.	Susu ultra coklat 250 ml	109	64	83	51	76	43	201	81	71	49	62	209
10.	Mie enak 22 gr	17	9	3	26	15	-	9	-	17	9	16	35

Dari data tabel di atas di buat perhitungan *safety stock* untuk setiap produknya. Perhitungan produk air mineral A PET 600 ml sebagai berikut :

Tabel 7. Data Produk Air Mineral A PET 600 ml Periode Januari – Desember 2019

Bulan Ke	X Permintaan	$\bar{X}$ Permintaan Harian	$\bar{X}$ Rata – rata	(X - $\bar{X}$ )	(X - $\bar{X}$ ) <sup>2</sup> Kuadrat
1	670	22,33333333	13,28055556	9,052777778	81,95278549
2	120	4	13,28055556	-9,280555556	86,12871142
3	237	7,9	13,28055556	-5,380555556	28,95037809
4	396	13,2	13,28055556	-0,080555556	0,006489198
5	387	12,9	13,28055556	-0,380555556	0,144822531
6	651	21,7	13,28055556	8,419444444	70,88704475
7	411	13,7	13,28055556	0,419444444	0,175933642
8	301	10,03333333	13,28055556	-3,247222222	10,54445216
9	201	6,7	13,28055556	-6,580555556	43,30371142
10	369	12,3	13,28055556	-0,980555556	0,961489198
11	469	15,63333333	13,28055556	2,352777778	5,535563272
12	569	18,96666667	13,28055556	5,686111111	32,33185957
Total					360,9232407

Sehingga standar deviasi nya :

$$\begin{aligned}\sigma &= \sqrt{\frac{\sum(X-\bar{X})^2}{n-1}} \\ &= \sqrt{\frac{360,9232407}{12-1}} \\ &= \sqrt{32,8112037} = 5,728\end{aligned}\quad (5)$$

Setelah itu mencari *safety stock* nya, Tingkat pelayanan (*service of level*). Tingkat pelayanan ini sesuai dengan kebijakan perusahaan terhadap resiko kehabisan persediaan untuk seluruh barang dagang. Resiko kehabisan bahan baku sesuai dengan kebijakan perusahaan adalah 90%. Tingkat pelayanan (*service level*) untuk 90% adalah 1,281552.

$$\begin{aligned}\text{Safety stock} &= \sigma \cdot Z \\ &= (5,728) (1,281552) \\ &= 7,34 \approx 7 \\ \text{Safet Stock} &= \partial \cdot Z \\ &= (5,728) \times (1,281552) \\ &= 7,34 \approx 7\end{aligned}\quad (6)$$

Perhitungan produk air mineral A PET 1500 ml sebagai berikut :

Tabel 8. Data Produk Air Mineral A PET 1500 ml Periode Januari – Desember 2019

n Bulan	X Permintaan	$\bar{X}$ Permintaan Harian	$\bar{X}$ Rata – rata	(X- $\bar{X}$ )	(X- $\bar{X}$ ) <sup>2</sup> Kuadrat
1	480	16	10,56111111	5,438888889	29,58151235
2	320	10,66666667	10,56111111	0,105555556	0,011141975
3	211	7,033333333	10,56111111	-3,527777778	12,44521605
4	132	4,4	10,56111111	-6,161111111	37,95929012
5	169	5,633333333	10,56111111	-4,927777778	24,28299383
6	578	19,26666667	10,56111111	8,705555556	75,78669753
7	231	7,7	10,56111111	-2,861111111	8,18595679
8	227	7,566666667	10,56111111	-2,994444444	8,966697531
9	267	8,9	10,56111111	-1,661111111	2,759290123
10	307	10,23333333	10,56111111	-0,327777778	0,107438272
11	283	9,433333333	10,56111111	-1,127777778	1,271882716
12	597	19,9	10,56111111	9,338888889	87,21484568
Total					288,572963

Sehingga standar deviasi nya :

$$\begin{aligned}\sigma &= \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}} \\ &= \sqrt{\frac{288,572963}{12-1}} \\ &= \sqrt{26,233} = 5,121 =\end{aligned}\quad (7)$$

Setelah itu mencari *safety stock* nya, Tingkat pelayanan (*service of level*). Tingkat pelayanan ini sesuai dengan kebijakan perusahaan terhadap resiko kehabisan persediaan untuk seluruh barang dagang. Resiko kehabisan bahan baku sesuai dengan kebijakan perusahaan yaitu 90%. Tingkat pelayanan (*service level*) untuk 90% adalah 1,281552.

$$\begin{aligned}\text{Safety stock} &= \sigma \cdot Z \\ &= (5,121) (1,281552) \\ &= 6,56 \approx 6 \\ \text{Safety Stock} &= \partial \cdot Z \\ &= (5,121) \times (1,281552) \\ &= 6,56 \sim 6\end{aligned}\quad (8)$$

Jumlah *safety stock* untuk masing masing produk :

Tabel 9. Jumlah *safety stock* Masing-Masing Barang

No.	Description	Standar Deviasi	Service Level	Service Factor	Safety Stock
1.	Air mineral A PET 600 ml	5,728	90%	1.2816	7
2.	Air mineral A PET 1500 ml	5,121	90%	1.2816	7
3.	Teh harum 350 ml	1,509	90%	1.2816	2
4.	Tolak angin anak 10 ml	0,757	90%	1.2816	1
5.	Susu bear 190 ml	0,810	90%	1.2816	1
6.	Kentang sapi panggang 80 gr	0,386	90%	1.2816	1
7.	Teh melati 350 ml	2,047	90%	1.2816	3
8.	Biskuit salut chese 10 gr	0,077	90%	1.2816	1
9.	Susu ultra Coklat 250 ml	1,863	90%	1.2816	3
10.	Mie enak 22gr	0,345	90%	1.2816	3

**Perhitungan ReOrder Point**

Perhitungan untuk *reorder point* :

1. Produk air mineral A PET 600 barang, dengan data sebagai berikut:

- *Lead time* : 3 hari.  
 - *Average usage* : 13 per dus (Penjualan rata – rata perhari).

Penjualan produk air mineral A PET 600 ml sebanyak 4781, dari penjualan tersebut dibagi jumlah hari kerja dalam satu tahun (365 hari).

$$\text{Average usage} = \frac{4781}{365} = 13 \text{ pcs}$$

*Safety stock* (SS) : 7

$$\begin{aligned} \text{ROP} &= (\text{AU.LT}) + \text{SS} \\ &= (13)(3) + 7 = 46 \end{aligned}$$

2. Produk air mineral A PET 1500 ml *average usage* nya 15 pcs.

*Safety stock* (SS) : 7

$$\begin{aligned} \text{ROP} &= (\text{AU.LT}) + \text{SS} \\ &= (15)(3) + 7 = 52 \end{aligned}$$

3. Produk the harum *average usage* nya 3 pcs.

*Safety stock* (SS) : 2

$$\begin{aligned} \text{ROP} &= (\text{AU.LT}) + \text{SS} \\ &= (3)(3) + 2 = 11 \end{aligned}$$

Berdasarkan data tersebut diperoleh hasil *reorder point* untuk semua produk sebagai berikut:

Tabel 10. Jumlah *Re-Order Point* untuk Masing-Masing Barang

No.	Description	Average Usage	Lead Time	SS	ROP
1.	Air mineral A PET 600 ml	13,09863014	3	7	46
2.	Air mineral A PET 1500 ml	14,43561644	3	7	52
3.	Teh harum 350 ml	3,263013699	3	2	11
4.	Tolak angin anak 10 ml	0,2	3	1	2
5.	Susu bear 190 ml	2,608219178	3	1	9
6.	Kentang sapi panggang 80 gr	0,616438356	3	1	3
7.	Teh melati 350 ml	3,709589041	3	3	15
8.	Biskuit salut <i>cheese</i> 10 gr	0,079452055	3	1	1
9.	Susu ultra coklat 250 ml	3,010958904	3	3	12
10.	Mie enak 22gr	0,42739726	3	3	5

**Pembahasan**

Dengan pendekatan metode ABC, pengelompokan barang di toko X dapat dibagi menjadi tiga kelompok:

1. Barang yang memiliki nilai klasifikasi A sejumlah 3 barang, presentase kumulatif permintaannya menyerap sekitar 0-80%.
2. Klasifikasi barang nilai B sejumlah 2 item barang, presentase kumulatif permintaan sejumlah 81-95%.
3. Klasifikasi nilai C, terdapat barang dengan 3 item barang dagang, presentase kumulatif nilai permintaannya dimulai dari 96-100%.

- Kategori A terdapat 3 item barang dagang, diantaranya: Air mineral A PET 600 ml, Air mineral A PET 600 ml 1500 ml dan susu bear 190 ml dengan nilai:

$$\begin{aligned} \text{Nilai volume} &= \text{total volume Aqua air PET 600ml} + \text{Aqua air PET 1500 ml} + \text{Bear brand ori 189 ml} \\ &= 20738784 + 10178749 + 7318024 = \text{Rp. } 38.235.557 \end{aligned}$$

- Kategori B terdapat 2 item barang dagang, diantaranya: susu ultra 250 ml dan the harum PET 350 ml

$$\begin{aligned} \text{Nilai volume} &= \text{Ultra milk UHT coklat 250ml} + \text{Pucuk harum PET 350 ml} \\ &= 4800432 + 2947725 = \text{Rp. } 7.748.157 \end{aligned}$$

- Kategori C terdapat 5 item barang dagang, diantaranya teh melati 350 ml, kentang sapi panggang 80gr, tolak angin anak 10 ml, mie enak 22gr dan biscuit salut chese 10gr.

$$\begin{aligned} \text{Nilai volume} &= \text{teh melati 350 ml, kentang sapi panggang 80gr, tolak angin anak 10 ml, mie enak 22gr} \\ &\quad \text{dan biscuit salut chese 10gr.} \\ &= 2592910 + 1510875 + 148847 + 142740 + 157470 = 4.552.842 \end{aligned}$$

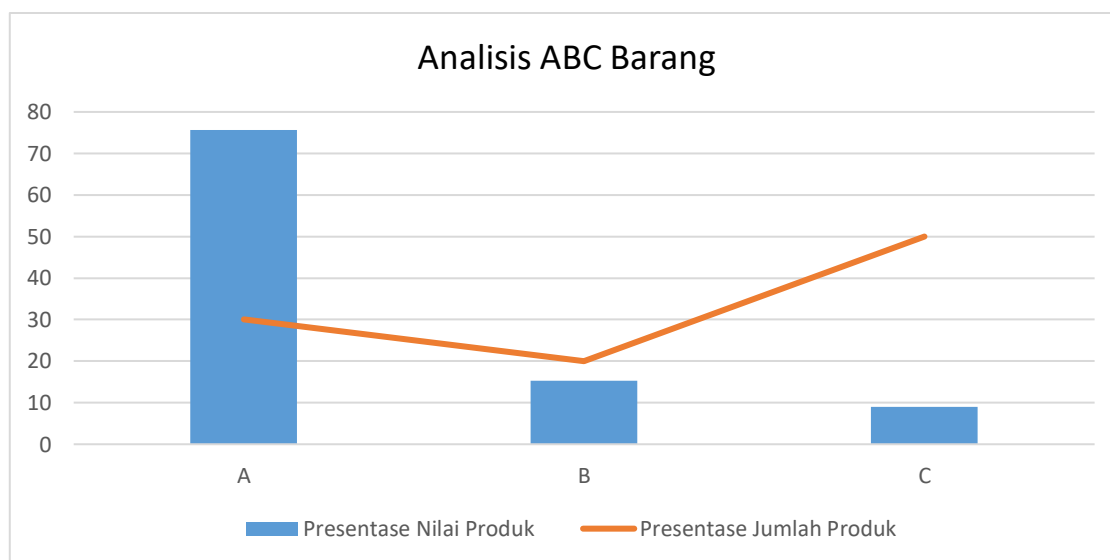
Pengelompokan barang kemudian di klasifikasikan lagi berdasar tiap – tiap kategori, sehingga diperoleh sebagai berikut:

Tabel 11. Klasifikasi produk berdasarkan metode ABC

Kelompok	Jenis Barang	Nilai Volume (Rp)	Presentase Nilai Volume (%)	Presentase jumlah jenis barang dagang (%)
A	3	Rp. 38.235.557	75,6593	30
B	2	Rp. 7.748.157	15,3318	20
C	5	Rp. 4.552.842	9,0089	50
Total	10	Rp. 50.536.556	100%	100%

Dari tabel diatas dapat dikategorikan menjadi:

1. Kategori A terdapat 3 dari 10 barang dagang, 30% jumlah barang, sedangkan nilai investasi total keseluruhan barang mencapai 75.6593% dari nilai total investasi sebesar Rp. 38.235.557,-.
2. Klasifikasi B terdapat 2 dari 10 barang dagang, 20% jumlah barang dari total keseluruhan jumlah barang dengan investasi kategori B mencapai 15,3318% senilai Rp. 7.748.157,-.
3. Kategori C terdapat 5 dari 10 barang dagang, 50% dari total keseluruhan barang. Nilai akumulasi barang kategori C mencapai 9,0089% dengan nilai Rp. 4.552.842,-.



Gambar 1. Diagram Pareto Metode ABC

Dengan penerapan metode ABC, dapat membantu Toko X dalam memilih serta mengklasifikasikan jenis komponen barang. Mana lebih utama dari pada komponen barang lainnya. Kategori A memiliki jumlah barang yang sedikit dengan penyerapan modal yang besar. Oleh karena itu barang dalam kategori A harus mendapat perhatian lebih dan dijaga persediaannya. Kageotori B memiliki jumlah barang sedang dengan penyerapan modal yang relatif sedang pula. Barang kategori B diperlukan pengendalian yang lunak dan tidak seketat produk-produk yang berada pada kategori A. Barang di kategori C memiliki jumlah menyerapan modal kecil, oleh karena itu dilakukan pengendalian sederhana. Barang-barang ini perlu melakukan pemeriksaan sesekali saja dengan memperhatikan permintaan pelanggan yang masuk.

Pengendalian yang lebih besar dibutuhkan untuk barang-barang yang masuk kategori A dibanding dengan barang yang ada pada kategori B dan kategori C. Barang pada kategori A pengendalian persediaan perlu diperhatikan secara lebih baik agar tidak memunculkan beban biaya yang besar karena merupakan kategori yang paling penting dalam proses produksi ini.. Dengan analisis ABC ini perusahaan dapat membedakan barang dagang yang memiliki prioritas utama yang lebih khusus dan memerlukan pengendalian yang lebih baik. Jenis barang yang akan dilakukan pengendalian persediaannya yaitu air mineral A PET 600 ml, air mineral A PET 1500 ml dan susu bear 190 ml karena penyerapan modal untuk pembelian atau investasi yang lebih besar dari pada barang dagang kelas B dan C.

#### Analisis Persediaan Pengaman (*Safety Stock*)

Perhitungan persediaan pengaman mempertimbangkan tingkat pelayanan (*service of level*) serta standar deviasi. Tingkat pelayanan (*service of level*) diperoleh berdasarkan kebijakan perusahaan terhadap resiko kehabisan persediaan untuk seluruh barang dagang. Pada toko X, resiko kehabisan bahan baku yang ditetapkan yaitu 90%. Menunjukkan besar kemungkinan permintaan tidak akan melebihi persediaan selama waktu tenggangnya sebesar 90%, sedangkan

untuk resiko terjadinya kekurangan persediaan (*stock of risk*) hanya 10%. Jadi tingkat pelayanan (*service level*) berdasarkan tabel Z untuk 90% adalah 1,281552. Menurut Rizki (2017:33) suatu persediaan yang dicadangkan untuk pengaman dari kelangsungan proses produksi sebuah perusahaan disebut dengan persediaan pengaman. Persediaan pengaman ini merupakan jumlah unit tertentu, unit ini akan tetap dipertahankan walaupun bahan baku diganti dengan yang bahan baku yang baru.

Berdasar tabel 8, untuk barang air mineral A PET 600 ml, didapatkan nilai *safety stock* sebanyak 7 pcs. Hal ini berarti bahwa perusahaan harus memiliki persediaan sebanyak 46 pcs untuk mengantisipasi terjadinya kekurangan barang selama waktu tenggang dalam kebutuhan dagangnya. Demikian pula dengan *safety stock* barang yang lain. Sedangkan untuk produk air mineral A PET 1500 ml dengan *safety stock* 7, toko harus memiliki persediaan 52 agar dapat mengantisipasi kekurangan barang pada waktu tenggang. Teh harum 350 ml dengan *safety stock* 2 berarti toko harus memiliki persediaan sebanyak 11 pcs untuk mengantisipasi terjadinya kekurangan barang selama waktu tenggang dalam kebutuhan dagangnya.

#### **Analisis Pemesanan Kembali (*Re-Order Point*)**

Suatu tingkat persediaan dimana pada saat itu harus dilakukan pemesanan dinamakan dengan *Reorder Point* (ROP). Apabila jumlah persediaan yang terdapat di dalam stok berkurang, maka titik pemesanan ulang akan terjadi. Oleh karena itu perusahaan harus menentukan titik pemesanan ulang agar tidak kehabisan stok maupun kelebihan stok. Persediaan maksimum yang berada digudang sejumlah persediaan maksimum pada masing-masing item persediaan barang agar tidak kehabisan dan membebani keuangan perusahaan. Perusahaan diharapkan dapat meminimalkan biaya persediaan serta meningkatkan efisiensi dengan melakukan pengendalian persediaan.

Toko X memiliki waktu tunggu sampai pesanan barang datang ke toko selama 3 hari, atau bisa dikatakan *lead time* (L) 3 hari. Dengan rata-rata jumlah hari 365 hari dalam satu tahun serta berdasarkan perhitungan ROP pada tabel 5 produk Air Mineral A PET 600 ml dapat melakukan pemesanan kembali ketika jumlah stok persediaan sebanyak 46 pcs.

#### **Hubungan Analisis ABC, *Safety Stock* dan *Reorder Point***

Faktor-faktor yang diperhatikan pada metode ABC adalah faktor harga atau nilai persediaan, frekuensi pemakaian, resiko kehilangan barang dan *lead time*. *Lead time* erat kaitannya dengan proses *order* atau pesan suatu barang. Dalam praktiknya, permintaan barang / penjualan tidak menentu. Permintaan suatu barang kadang turun atau bahkan naik. Perusahaan perlu menyediakan persediaan pengaman agar dapat memenuhi melonjaknya permintaan yang tak terduga sebelumnya. Dalam pemenuhan barang tersebut tentunya juga memerlukan waktu, terutama dalam memesan barang. Barang harus tersedia pada saat dibutuhkan. Oleh karena itu waktu pemesanan harus diperhitungkan dengan matang agar tidak mengganggu proses penjualan barang yang dibutuhkan oleh konsumen.

#### **Kesimpulan**

Berdasarkan pendekatan metode ABC, dapat kategorikan barang sebagai berikut :

1. - Kategori A terdapat 3 item barang dagang, diantaranya : air mineral A PET 600 ml, air mineral A PET 1500 ml dan susu bear 189 ml dengan nilai Rp. 38.235.557,-  
- Kategori B terdapat 2 item barang dagang, diantaranya : susu ultra coklat 250 ml dan teh harum PET 350 ml total nilai Rp. 7.748.157,-  
- Kategori C terdapat 5 item barang dagang, diantaranya: teh melati PET 350 ml, kentang sapi panggang 80gr, tolak angin anak 10 ml, mie enak 22gr dan biskuit salut chese 10gr.
2. Dengan pendekatan metode ABC, perusahaan dalam pemesanan barang menyesuaikan dengan *inventory* atau stok minimal yang ditetapkan perusahaan.
3. Dengan menggunakan metode ABC dapat diketahui barang yang harus diprioritaskan dari 3 jenis barang. Barang dagang yang memiliki nilai total volume rupiah yang sangat tinggi, maka diperlukan pengawasan yang ketat dalam pengendalian persediaannya. Dalam perhitungan pada persediaan barang dagang kelompok A, dapat diketahui bahwa semakin tinggi nilai investasi, maka jumlah atau frekuensi pemesanan barang dagang juga semakin bertambah.
4. Pemesanan ekonomis untuk persediaan barang kategori A meliputi:
  - Air mineral A PET 600 ml dengan pemesanan dilakukan saat persediaan memasuki 7 pcs, dengan persediaan pengaman 46 pcs.
  - Air mineral A PET 1500 ML dilakukan pemesanan persediaan memasuki 7 pcs, dengan persediaan pengaman 52 pcs.
  - Susu bear brand 189 ml dengan pemesanan saat persediaan memasuki 11 pcs, dengan persediaan pengaman 39 pcs.

### Daftar Notasi

- AU = Pemakaian bahan baku rata-rata per hari  
L = Waktu tunggu  
SS = Persediaan pengaman

### Daftar Pustaka

- Afianti, Happy Fauzi.; Azwir, Hery Hamdi.(Desember, 2017), Pengendalian Persediaan Dan Penjadwalan Pasokan Bahan Baku Impor Dengan Metode ABC Analysis Di PT. Unilever Indonesia, Cikarang, Jawa Barat, *Jurnal IPTEK*, 21 (2), 77-90.
- Ramadhan, Anggitia. (2014), Sistem Pengawasan Dan Pengendalian Persediaan Pbat Di RSAU DR. Salamun Bandung, *Jurnal Ilmiah Komputer dan Informatika (KOMPUTA)*. 1-12.
- Rofiq, Abdul.; Oetari, ; Widodo, Gunawan Pamudji. (Oktober, 2020), Analisis Pengendalian Persediaan Obat Dengan Metode ABC, VEN dan EOQ di Rumah Sakit Bhayangkara Kediri, *Journal of Pharmaceutical Science and Clinical Research*, 5 (2), 97-109.
- Guslan,Darfial.; Saputra, Ibrahim. (Mei, 2020), Analisis Pengendalian Inventori Dengan Klasifikasi ABC dan EOQ Pada PT Nissan Motor Distributor Indonesia, *Jurnal Logistik Bisnis*, 10 (1), 73-77.
- Hidayat, Dian F.; Sutaarga, Okta.; Fakhrurozi, Akhmad. (Januari, 2019), Analisa Pengendalian Persediaan Gudang Barang Jadi Dengan Analisa ABC Pada Perusahaan Cat PT. PR, *Journal Industrial Manufacturing*, 4 (1), 63-66.
- Putra, Dewa Gede Putra Narendra.; Purnawati, Ni Ketut. (2018), Kinerja Manajemen Persediaan Barang Dagangan PT. Artha Dinamis Sentosa Bali, *E-Jurnal Manajemen Unud*, 7 (10), 5599-5627.
- Sofia, Eka A.; Otik Saraswati, Mitha.; Agustya Ningrum, Dewi. (September, 2020), Analisa Pengendalian Persediaan Suku Cadang Pada PT. XYZ Dengan Metode Analisis ABC. *Jurnal Abirawa*, 2 (1), 05-13.
- Chatisa, Ivan.; Muslim, Istianah.; Sari, Rika Perdana. (Mei, 2019), Implementasi Metode Klasifikasi ABC pada Warehouse Management System PT. Cakrawala Tunggal Sejahtera, *JNTETI*, 8 (2), 123-134.
- Junaidi (Maret, 2019), Penerapan Metode ABC Terhadap Pengendalian Persediaan Bahan Baku Pada UD. Mayong Sari Probolinggo, *Jurnal Ekonomi dan Bisnis CAPITAL*, 2 (2), 158-174.
- A, Nadhif.; Pulansari, Farida.; Sunardi (2018), Optimalisasi Inventory Management Produk Jadi Dengan Menggunakan Analisis ABC (*Always Better Control*) Dan Metode Lagrange Multiplier Di PT. SDN Surabaya, *Tekmapro: Journal of Industrial Engineering and Management*, 13 (01), 29-40.
- Aprilia, Putri.; Dahda, Salim Said.; Ismiyah, Elly. (2020), Aplikasi Metode *Always Better Control* Dan *Economic Order Quantity* Pada Perencanaan Dan Pengendalian Barang Jadi, *Jurnal Sistem Dan Teknik Industri*, 1 (1), 101.
- Noviani, Ricca.; Nasution, Yuki Novia.; Rizki, Arista. (November, 2017), Klasifikasi Persediaan Barang Menggunakan Analisis *Always Better Control* (ABC) dan Prediksi Permintaan dengan Metode *Monte Carlo* (Studi Kasus: Persediaan Obat Pada Apotek Mega Rizki Tahun 2016), *Jurnal Eksponensial*, 8 (2), 103-110.
- Fatma,Stefania. (Desember, 2013), Penerapan Metode Activity Based Costing Dalam Menentukan Cost Kamar Hotel Pada XYZ Hotel, *Jurnal Akuntansi, Ekonomi dan Manajemen Bisnis*, 1 (2), 175-182.
- Wulandari, Siska.; Sugiarto. (Desember 2019), Model Pengadaan Obat dengan Metode ABC VEN di RS X Semarang, *Jurnal Manajemen Kesehatan*, 7 (3), 186-190.

## Pengaruh Elemen Paduan dan Senyawa terhadap Karakteristik Paduan Magnesium dan Aplikasinya – Kajian

Adi Ganda Putra<sup>1,2</sup>, Azwar Manaf<sup>2</sup>, dan Djoko HP<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Manufaktur, Universitas Jenderal Achmad Yani, Bandung, Indonesia

<sup>2</sup> Departemen Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia

<sup>3</sup>PTNBR, BATAN, Jln. Tamansari 71 Bandung 40317 Indonesia

[adi.ganda@ui.ac.id](mailto:adi.ganda@ui.ac.id), [azwar@ui.ac.id](mailto:azwar@ui.ac.id), [joko60@gmail.com](mailto:joko60@gmail.com)

### Abstrak

Paduan berbasis Magnesium sebagai logam struktural yang paling ringan dan Mg memiliki potensi aplikasi yang besar dalam industri otomotif dan kedirgantaraan. Namun, Magnesium pada aplikasinya tersebut dibatasi oleh kekuatan dan keuletan yang rendah. Cara yang paling efektif untuk meningkatkan kekuatan dan keuletan adalah dengan penambahan unsur paduan, penghalusan butir dan penguatan dispersi. Namun, teknik penguatan secara universal untuk paduan magnesium masih terus dilakukan penelitian dan beberapa masih diperdebatkan. Makalah ini menyajikan tinjauan singkat tentang pengembangan metode penambahan elemen paduan untuk paduan magnesium, yang akan berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang faktor-faktor yang mengendalikan sifat mekanik dan memberikan pandangan penelitian masa depan di bidang ini.

Kata Kunci: Paduan Magnesium, Elemen paduan, Penghalusan butir, Sifat mekanik

### Abstract

Alloys based on Magnesium the lightest structural metal and Mg have great application potential in the automotive and aerospace industries. However, Magnesium in its application is limited by its low strength and ductility. The most effective way to increase strength and ductility is by adding alloying elements, grain refinement, and dispersion strengthening. However, universal strengthening techniques for magnesium alloys are still being researched, and some are still being debated. This paper presents a brief overview of the development of methods of adding alloying elements to magnesium alloys, contributing to a better understanding of the factors controlling mechanical properties and providing an outlook for future research in this area.

Keywords: Magnesium Alloys, Alloying elements, Grain refinement, Mechanical properties

### 1. Pendahuluan

Paduan Magnesium merupakan material logam yang memiliki struktur paling ringan di antara logam-logam industri lainnya. Kombinasi dari modulus young dan kekuatan spesifik yang tinggi dari paduan Magnesium menunjukkan nilai yang sama atau lebih baik dibandingkan dengan aluminium dan baja komersil. Seperti kebanyakan logam lainnya, Magnesium jarang digunakan dalam bentuk elemen murni. Penambahan elemen paduan untuk memperbaiki atau meningkatkan sifat dari Magnesium. Perbaikan sifat paduan Magnesium dapat pula melalui proses penempaan selain proses pengecoran. Magnesium memiliki kekuatan tarik sekitar 190 Mpa, kekuatan *creep*-nya sekitar 98 MPa dan elongasi sekitar 16% (Krisnawan, 2009) kira-kira sekitar 2 sampai 3 kali lebih kuat dari logam aluminium.

Magnesium dan paduannya mempunyai sifat-sifat seperti: densitas rendah, kekuatan tinggi, konduktivitas termal yang tinggi, mudah dalam pembuatan, mudah didaur ulang, *biocompatible*, (G.-L. Song, 2011). Selama beberapa dekade sebelumnya, Magnesium dikenal sebagai elemen yang terlupakan, namun seiring dengan tingginya masalah tingkat pencemaran akibat gas buang kendaraan, berkurangnya cadangan bahan bakar minyak dan mobilitas masyarakat yang tinggi, menjadikan Magnesium sebagai pilihan material alternatif yang dapat mengurangi masalah masalah tersebut. Jepang pada tahun 1999 mulai mengembangkan pemanfaatan paduan Magnesium untuk berbagai aplikasi dengan membangun program yang diberi nama “*Magnesium Platform Science and Technology for Advanced Magnesium Alloys*” (Kojima, 2001).

Penggunaan paduan Magnesium semakin meluas dikarenakan sifat mekanik paduan Magnesium yang meningkat dengan ditamahnya elemen-elemen pepaduan. Penerapan material ringan menjadi pilihan dalam pembuatan komponen otomotif (misalnya pada aplikasi komponen otomotif, antara lain *drive brackets, oil pan, steering column brackets, 4-wheel drive transfer case, manual transmission case, induction cover, clutch pedal, brake pedal, steering column brackets, crankcase, chain housing, steering box, rear-link arms, subframe* badan dan rangka kendaraan) di masa depan. Berat kendaraan secara umum dipengaruhi oleh 3 komponen yaitu mesin (28%), badan (28%) dan rangka kendaraan (27%) (James *et al.*, n.d.). Data dari kementerian sumber daya alam dan energi di Jepang, bidang

#### Info Makalah:

Dikirim : 09-15-21;

Revisi 1 : 11-14-21;

Diterima : 12-03-21.

#### Penulis Korespondensi:

Telp : +62-812-9475-563

e-mail : [azwar@ui.ac.id](mailto:azwar@ui.ac.id)

transportasi menggunakan 60 % konsumsi energi sehingga diperlukan suatu kendaraan yang dapat menghemat energi dan menurunkan pencemaran lingkungan. (Watarai, 2006).

Peningkatan berat kendaraan merupakan respon tuntutan dari konsumen kendaraan bermotor yang tak terhindarkan terkait dengan masalah keamanan, kenyamanan dan kemewahan dalam berkendara. Rasio masa jenis yang rendah dengan kekuatan yang ada pada paduan Magnesium merupakan sebuah keuntungan yang mendasari penggunaan paduan Magnesium pada industri transportasi, dimana penurunan berat juga akan menurunkan konsumsi bahan bakar dan emisi. Pada industri otomotif penggunaan Magnesium biasanya terpusat pada bagian depan kendaraan yang berhubungan dengan mesin diantaranya *casing engine*, *front engine cover*, dan lainnya. Pengurangan berat pada bagian ini bisa membantu meningkatkan performa dan kesetimbangan berat. Penggunaan Magnesium mempunyai banyak keuntungan antara lain hampir tidak mengalami perubahan dimensi berkaitan dengan perubahan temperatur dalam waktu pemakaian yang lama, dapat menyerap getaran, mudah diproses dan permukaan halus.

Industri otomotif sudah mulai mengembangkan paduan Magnesium. Sebagai contoh, pada tahun 2002 perusahaan mobil VW telah berhasil membuat kendaraan yang disebut *1 litre Car* (konsep kendaraan sangat ekonomis). Penggunaan paduan Magnesium menghasilkan berat total kendaraan hanya 290 kg (1/3 dari berat kendaraan pada umumnya). Kendaraan tersebut dapat berjalan sejauh 100 km dengan konsumsi bahan bakar sebanyak 0,89 liter (Kawamura, 2010). Komponen yang berpotensi digantikan oleh paduan Magnesium antara lain panel-panel instrument, aplikasi *power train*. Selain itu komponen yang paling potensial mengurangi berat kendaraan adalah pada *chasis*.

Aplikasi Mg pada industri otomotif seperti kendaraan *VW beetle* terbukti berkurang karena dibutuhkan unjuk kerja dari komponen yang lebih tinggi. Persyaratan untuk mengurangi rasio berat pada komponen mobil sebagai akibat dari tuntutan yang membatasi emisi telah memicu dilakukannya penelitian baru pada logam Magnesium. Pada tahun 1944, konsumsi dunia terhadap penggunaan Magnesium telah mencapai 228.000 ton/tahun dan turun setelah perang dunia II menjadi 10.000 ton/tahun. Pada tahun 1998 konsumsi logam Mg meningkat kembali menjadi 360.000 ton/tahun dengan harga US \$ 3,6 per kg. Tingkat pertumbuhan penggunaan Magnesium selama 10 tahun ke depan diperkirakan meningkat 7% per tahun (Mordike & Ebert, 2001). Paduan Magnesium merupakan material logam yang memiliki struktur paling ringan diantara logam-logam industri lainnya. Kombinasi dari *modulus elastis* dan kekuatan tarik yang tinggi dari paduan Magnesium menunjukkan nilai yang sama atau lebih baik dibandingkan aluminium dan baja komersil, perbandingan sifat fisik. Pada Tabel 1, diringkaskan beberapa keunggulan dan kelemahan dari perbandingan karakteristik logam besi (Fe), Aluminium (Al) dan Magnesium (Mg). Mg memiliki keunggulan lebih ringan 35 % dari Al dan 77% dari Fe namun kelemahannya memiliki kekakuan spesifik dan keuletan yang rendah.

Tabel 1. Perbandingan Sifat Fisik dan Mekanik dari Material, (James *et al.*, 2011)

Property	Mg	Al	Fe
Atomic number	12	13	26
Atomic weight	24,32	26,98	58,7
Crystal structure	HCP	FCC	BCC
Density at 20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	1,74	2,70	7,86
Elastic modulus (GPa)	45	69	207
Melting point °C	650	660	1536
Boiling point °C	1105	2520	2862
Poisson's ratio	0,35	0,33	0,33
Specific strength (kNm/kg)	35-260	7-200	30-50
Specific stiffness (MNm/kg)	21-29	25-38	28-30

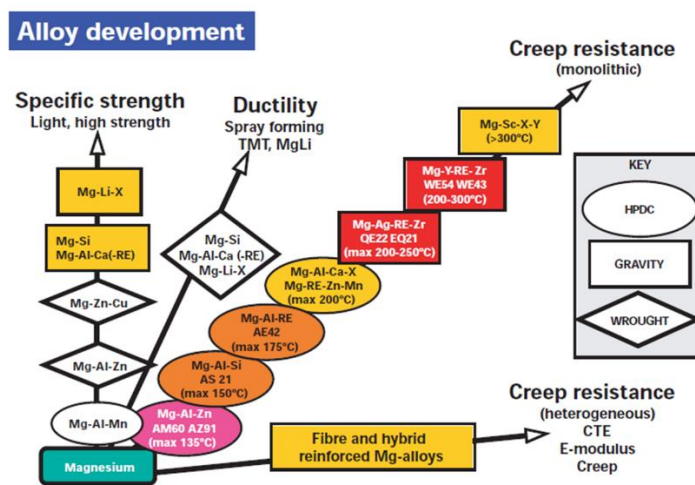
Tabel 2. Kode Paduan Magnesium Berdasarkan Elemen Tambahan (ASM Handbook, 1999).

Kode Huruf	Elemen pepadu
A	Aluminium (Al)
C	Tembaga (Cu)
E	Logam tanah jarang (RE)
H	Thorium (Th)
K	Zirconium (Zr)
L	Lithium (Li)
M	Mangan (Mn)
Q	Perak (Ag)
S	Silicon (Si)
W	Yttrium (Y)
Z	Seng (Zn)



Perbaikan beberapa sifat logam Magnesium dapat dilakukan dengan teknologi pemaduan secara mekanik atau *mechanical alloying*. Tebel 2 menunjukkan kodefikasi berdasarkan penambahan elemen paduan pada Magnesium. Kelarutan elemen paduan didalam logam Magnesium sangat terbatas, hal ini pula yang membatasi peningkatan kekuatan dan perilaku sifat ketahanan korosi. Sifat keuletan logam Magnesium rendah dikarenakan memiliki struktur kristal berbentuk heksagonal susunan rapat (hcp) yang hanya memiliki satu bidang susunan tumpuk padat yaitu bidang basal (0001).

Penelitian dan pengembangan paduan Magnesium pada masa lalu sangat terbatas karena kurangnya penggunaan logam Magnesium pada skala besar. Akibatnya, paduan Magnesium cor banyak tersedia sedangkan paduan tempa sangat sedikit. Sifat yang dipersyaratkan komponen otomotif dan potensi logam Magnesium dapat menggantikan bahan komponen yang ada, menuntut dilakukan pengembangan paduan Magnesium agar memenuhi semua persyaratan. Kebutuhan penggantian komponen otomotif tidak hanya berdasarkan karena alasan biaya saja tetapi sifat yang tidak sesuai dengan yang diharapkan. Gambar 1. memperlihatkan arah pengembangan paduan sesuai dengan sifat yang dibutuhkan. Penambahan unsur pada paduan Magnesium secara spesifik dapat menentukan sifat yang diinginkan seperti peningkatan kekuatan, keuletan, ketahanan mulur melalui berbagai teknologi proses yaitu pembentukan, pengecoran dan pengecoran tertutup dengan tekanan tinggi.



Gambar 1. Arah Pengembangan Paduan Magnesium Sesuai Sifat yang Dibutuhkan (Mordike & Ebert, 2001)

Magnesium adalah elemen kimia dalam tabel periodik yang memiliki simbol Mg dan nomor atom 12 serta berat atom 24,31 g/mol. Magnesium adalah elemen terbanyak kedelapan yang membentuk 2,7% berat di bumi, serta merupakan elemen terlarut ketiga terbanyak pada air laut. Magnesium merupakan logam dengan berat jenis 1,7 g/cm<sup>3</sup>, lebih ringan dari Aluminium (2,7 g/cm<sup>3</sup>), Titanium (4,5 g/cm<sup>3</sup>) dan Besi (7,9 g/cm<sup>3</sup>) (James et al., n.d.). Magnesium bersumber dari mineral dolomit (CaCO<sub>3</sub>.MgCO<sub>3</sub>), magnesit (MgCO<sub>3</sub>). Dolomit termasuk rumpun mineral karbonat, mineral dolomit murni secara teoritis mengandung 45,6% MgCO<sub>3</sub> atau 21,9% MgO dan 54,3% CaCO<sub>3</sub> atau 30,4% CaO. Rumus kimia mineral dolomit dapat ditulis meliputi CaCO<sub>3</sub>.MgCO<sub>3</sub>, CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> atau CaxMg1-xCO<sub>3</sub>, dengan nilai x lebih kecil dari satu. Dolomit tersebar hampir di sebagian besar daerah di Indonesia, namun jumlahnya relatif jauh lebih kecil dan hanya berupa lapisan tipis pada endapan batu gamping, tetapi yang mempunyai jumlah sumberdaya cukup besar adalah di Sumatera Utara, Sumatera Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur dan Madura serta Papua. (Tushadi, 1990).

Magnesium murni memiliki kekuatan tarik sebesar 110 N/mm<sup>2</sup> dalam bentuk hasil pengecoran (*casting*), kekuatan tarik ini dapat ditingkatkan melalui proses pengerjaan. Magnesium bersifat lunak dengan modulus elastisitas yang sangat rendah 45 GPa (Al = 69 GPa; Baja = 207 GPa). Magnesium memiliki perbedaan dengan logam lain termasuk dengan aluminium, baja dan tembaga dalam sifat pengerjaannya di mana Magnesium memiliki struktur hexagonal sehingga tidak mudah terjadi geseran. Oleh karena itu, Magnesium tidak mudah dibentuk dengan pengerjaan dingin. Cara yang paling efektif untuk meningkatkan kekuatan dan keuletan paduan Magnesium adalah dengan penambahan elemen paduan. Klasifikasi paduan Magnesium diatur berdasarkan kandungan elemen serta proses pembuatan paduan tersebut. Kode yang mewakili paduan tersebut bila dilihat dari komposisi kimia di dalamnya dapat ditunjukkan pada Tabel 2.

Paduan Magnesium mempunyai kekuatan, kekakuan spesifik, kestabilan dimensi, mampu redam dan mampu didaur ulang yang sangat baik. Berdasarkan keunggulan-keunggulan tersebut dan dalam rangka menurunkan dampak lingkungan dengan menggunakan konstruksi ringan, berbagai penelitian dan pengembangan paduan Magnesium telah dilakukan untuk aplikasi industri. Magnesium dan paduannya menjadi material yang memainkan peranan penting untuk produk-produk komponen otomotif, aeronotika dan elektronik (Yang, et.al., 2008). Penambahan elemen Al pada paduan Mg-Al akan memperkaya kandungan oksida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sehingga membentuk matriks pada permukaan

lapisan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (Nordlien *et al.*, 1997). Penambahan elemen Zn dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan akan tetapi dapat mengurangi ketahanan korosi sehingga Zn biasanya digunakan kurang dari 3%. Ukuran dan distribusi fasa pengotor menyebabkan Magnesium mudah terkorosi. dan penambahan elemen Al membentuk fasa β-Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> memiliki pengaruh besar terhadap ketahanan laju korosi. Perlakuan panas dan pendinginan lambat meningkatkan ukuran dan bentuk endapan (presipitat) yang menyebabkan menurunnya laju korosi (Distribution, n.d.2004)

Logam Mg murni memiliki sifat yang lunak dan secara mekanik kekuatannya rendah. Namun ada beberapa peningkatan pada pengembangan paduan Mg untuk aplikasi yang berbeda seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Paduan Mg merupakan material multi fasa yang terdiri atas partikel intermetalik yang terdispersi dalam matrik α-Mg. Multi fasa ini terjadi disebabkan adanya ketidakseimbangan proses pembekuan yang memungkinkan kekuatan mekanik dari material berubah. Paduan yang memiliki sifat ini adalah kelompok paduan dengan adanya elemen tambahan Al seperti AZ91, AM60, AM50 dan AZ31. Diagram fasa memberikan informasi yang penting dari paduan Mg-Al seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3, dengan penambahan 6% berat Al akan dapat menghasilkan kekuatan dan keuletan optimum (Mordike & Ebert, 2001). Fasa yang terbentuk hasil proses pengecoran pada paduan Mg-Al terdiri dari α-Mg dengan sel satuan Hexagonal, *spece group* P6<sub>3</sub>/mmc, a = 0,32 nm dan c = 0,521 nm, adanya porositas dan fasa α-Mg sekunder dengan struktur interdendritik .(Esmaily *et al.*, 2017)

Klasifikasi paduan Magnesium diatur berdasarkan kandungan elemen serta proses pembuatan paduan tersebut. Kodefikasi standar paduan Magnesium mengidentifikasi elemen paduan yang ditambahkan yang dapat dilihat dari komposisi kimia. Tabel 3. Menunjukkan kodefikasi paduan Mg berdasarkan jenis paduan yang digunakan secara umum memiliki perbedaan dari komposisi kimia serta teknologi proses pembuatannya. Sebagai contoh kode AZ91E adalah paduan Magnesium dengan elemen yang ditambahkan adalah Aluminium (A) 9 % berat dan Seng (Z) 1% berat dan 2% berat Calsium (E) dengan teknologi proses pengecoran cetakan pasir (sand casting/SC) dan cetakan permanent (permanent mold/PM)

Tabel 3. Kodefikasi Paduan Magnesium dengan Elemen Pemasu Didalamnya. (Mayer Kuts, 2006)

ASTM Designation	Ag	Al	Fe max	Mn	Ni max	Rare Earth	Si	Zn	Zr	Forms
AM50A		4.9	0.004	0.32	0.002			0.22		DC
AM60B		6.0	0.005	0.42	0.002			0.22 max.		DC
AS41B		4.2	0.0035	0.52	0.002		1.0	0.12		DC
AZ91D		9	0.005	0.33	0.002			0.7		DC
ACM522		5.3		0.17		2.6	E			DC
AJ52A		5		0.38		C		0.20		DC
AJ62A		6		0.38		D		0.20		DC
AZ31B		3	0.005	0.6	0.005			1		S, P, F, E
AZ61A		6.5	0.005	0.33	0.005			0.9		F, E
AZ80A		8.5	0.005	0.31	0.005			0.5		F, E
AZ81A		7.6		0.24				0.7		SC, PM, IC
AZ91E		9	0.005	0.26	0.0010			0.7		SC, PM
EZ33A						3.2		2.5	0.7	SC, PM
K1A									0.7	SC, PM
M1A				1.6						E
QE22A	2.5					2.2			0.7	SC, PM, IC
WE43A			0.01	0.15	0.005	A		0.20	0.7	SC, PM, IC
WE54A				0.15	0.005	B			0.7	SC, PM, IC
ZE41A				0.15		1.2		4.2	0.7	SC, PM, IC
ZE63A						2.6		5.8	0.7	SC, PM, IC
ZK40A								4	0.7	E
ZK60A								5.5	0.7	F, E

A = 4 Yttrium; 3 RE. C = 2.0 Strontium. E = 2.0 Calcium.  
 B = 5.1 Yttrium; 4 RE. D = 2.5 Strontium.  
 DC = die casting; E = extrusion; F = forging; IC = investment casting; P = plate; PM = permanent mold; S = sheet;  
 SC = sand casting

Berdasarkan proses pengerjaan paduan Magnesium dapat dibagi dalam 2 jenis yaitu paduan cor dan paduan tempa. Paduan Magnesium komersil utama antara lain seri AZ (Mg-Al-Zn), seri AM (Mg-Al-Mn), seri AE (Mg-Al-RE), seri EZ (Mg-RE-Zn), seri ZK (Mg-Zn-Zr) dan seri WE (Mg-RE-Zr). Lebih dari 90% paduan Magnesium untuk komponen-komponen struktural dibuat dengan proses pengecoran, khususnya dengan proses *die-casting*.

Identifikasi dan tantangan penggunaan logam Magnesium untuk aplikasi industri transportasi telah diusulkan dalam pertemuan United State Automotive Materials Partnership (USAMP), Automotive Metals Division (AMD) di kantor United State Council for Automotive Research (USCAR) pada tanggal 7 Desember 2004 yang menghasilkan dokumen, "Visi Magnesium 2020 ". Enam puluh satu anggota industri otomotif Amerika Utara (NA) bertemu untuk membahas kemungkinan dampak kolaborasi global terhadap penggunaan Magnesium. Sehingga pada saat ini, akademisi dan industri banyak melakukan penelitian pengembangan paduan Magnesium guna mengatasi tantangan yang dapat memperluas penggunaan di industry otomotif dalam skala besar. (menghasilkan lebih dari 99 % komponen otomotif terbuat dari paduan Magnesium). (Distribution, n.d, 2004.).

Perbandingan penurunan berat paduan Magnesium terhadap baja sebesar 45-80%, terhadap baja ringan turun sebesar 35-55% dan terhadap Aluminium turun sebesar 20-35%. (USAMP, 2006). Dalam reduksi berat kendaraan, terdapat beberapa material yang dapat digunakan, diantaranya adalah *high strength steel*, paduan magnesium, paduan aluminium, *glass fiber composite* dan *carbon fiber composite*. Tabel 4 menunjukkan Magnesium dan *carbon fiber*

composite memiliki reduksi berat tertinggi terhadap baja karbon rendah yang merupakan material tradisional untuk komponen kendaraan yaitu sebesar 55-60%. (Kardys, 2017a)

Pada dekade terakhir ini paduan Magnesium seri AZ, terutama paduan AZ91 telah banyak dipelajari dan dipakai untuk beberapa komponen struktural dari otomotif dan pesawat terbang karena memiliki kekuatan spesifik dan sifat mampu cor yang baik. Dari sudut pandang aplikasi, paduan tempa Magnesium jika dibandingkan dengan paduan cor memiliki peluang yang menjanjikan. Inilah yang menyebabkan paduan tempa Magnesium yang berkemampuan tinggi, teknologi proses baru, dan berkualitas tinggi banyak dikembangkan dan diteliti. Tabel 4 menunjukkan reduksi berat dari masing-masing material terhadap baja karbon rendah. Magnesium memiliki reduksi ratio berat 55 -60%.

Tabel 4. Pengurangan Berat Material Ringan Terhadap Baja Karbon Rendah (Kardys, 2017b)

Material	Weight Reduction vs. Low-Carbon Steel
High-Strength Steel	15-20%
Glass-fiber composite	25-35%
Aluminium	40-50%
Magnesium	55-60%
Carbon-fiber composite	55-60%

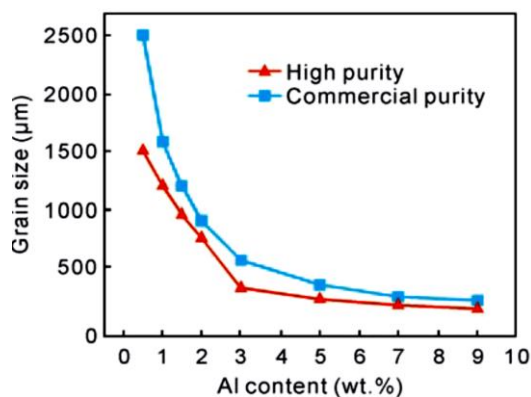
## 2. Metode Pengembangan Paduan Magnesium

Penambahan elemen padu pada paduan Magnesium dilakukan agar diperoleh paduan Magnesium yang lebih berdaya guna. Dalam penambahan elemen pada paduan Magnesium dapat dibagi dalam 3 katagori, yaitu: (Yang *et al.*, 2008), yang pertama adalah elemen yang dapat meningkatkan kekuatan dan keuletan yaitu elemen Al, Zn, Ca, Ag, Ce, Ni, Cu dan Th, yang kedua adalah elemen yang hanya dapat meningkatkan keuletannya saja tetapi mempunyai sedikit pengaruh terhadap kekuatan yaitu Cd, Tl dan Li, dan yang ketiga adalah elemen yang dapat menurunkan keuletan tetapi meningkatkan kekuatan yaitu Sn, Pb, Bi dan Sb.

Proses pemaduan pada paduan Magnesium umumnya dilakukan pada saat proses peleburan (pencairan), melalui berbagai metoda proses pembentukan diantaranya *die casting (DC)*, *extrusion (E)*, *forging (F)*, *investment casting (IC)*, *permanent mold (PM)*, *sand canting (SC)*, *sheet metal forming (SMF)*.

### 2.1. Pengaruh penambahan elemen pada paduan Magnesium

Penambahan Aluminium pada Magnesium bertujuan untuk meningkatkan kekuatan, mampu cor dan ketahanan korosi. Aluminium dapat larut didalam Magnesium sebanyak 12,7% pada suhu 437° C dan kelarutannya berkurang bersamaan dengan turunnya suhu (ASM International, 1992). Pada paduan Mg-Al, fasa-β yaitu Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> dapat terbentuk, dan menurunkan ketahanan mulur, sehingga diperlukan elemen padu lainnya yang mampu membentuk senyawa intermetalik dengan aluminium dengan tujuan membatasi pertumbuhan fasa β (C. Song *et al.*, 2009). Aluminium berikatan dengan karbon membentuk partikel Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>. Karbon berasal dari pengotor yang ada pada saat logam dalam keadaan cair. Partikel pengotor yang terbentuk tersebut menyebabkan terjadinya efek penghalusan butir pada matriks α-Mg. Gambar 2 memperlihatkan pengaruh penambahan aluminium terhadap ukuran butir pada paduan Mg murni dan komersial, semakin banyak Al yang ditambahkan dalam % berat akan memepengaruhi terhadap ukuran besar butir. Pada Mg murni tapa penambahan Al memiliki ukuran butir 1500 μm, dengan penambahan Al sebesar 9 % berat terjadi penghalusan ukuran butir menjadi 250 μm.



Gambar 2. Pengaruh Kemurnian Elemen Al Terhadap Ukuran Butir (C. Song *et al.*, 2009)

Adanya Al pada Mg dapat membentuk senyawa intermetalik diantaranya adalah Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>, Mg<sub>x</sub>Me<sub>y</sub> dan Al<sub>z</sub>Me<sub>w</sub>. Untuk menekan pertumbuhan fasa β Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>, maka diperlukan elemen Me (logam) yang memiliki afinitas lebih tinggi terhadap Al dibandingkan Mg, sehingga Al<sub>z</sub>Me<sub>w</sub> kemungkinan besar akan terbentuk. Elemen yang mampu

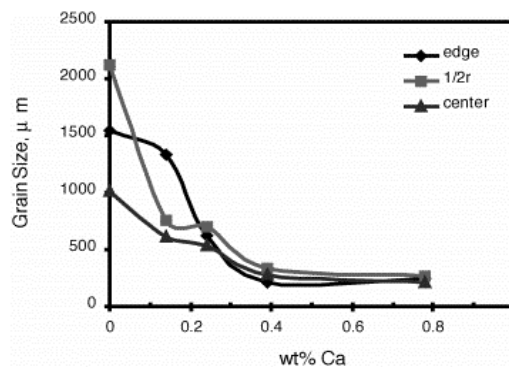
membentuk senyawa intermetalik adalah elemen tanah jarang, alkali tanah dan elemen transisi 3d. (Aghion & Bronfin, 2004; ASM International, 1992). Untuk meningkatkan fluiditas, kekuatan pada suhu kamar dan mengurangi efek korosif besi dan nikel, seng umumnya ditambahkan pada paduan Mg-Al. Namun, penambahan seng dengan konsentrasi 1,0-1,5% terhadap paduan Magnesium dengan aluminium 7-10% dapat menyebabkan retakan panas (*hot cracking*) (ASM International, 1992).

Penambahan karbon (untuk membentuk partikel nukleasi ( $Al_4C_3$ ) saat ini adalah salah satu yang paling populer dan metode efektif untuk menurunkan ukuran butir paduan Mg-Al. Karbon dapat ditambahkan dalam bentuk serbuk. Menurut Motegi, (Yano et al., 2003) metode penambahan karbon yang paling efektif adalah melalui penggunaan klorida organik seperti *hexachloroethane* ( $C_2Cl_6$ ) dan karbon tetraklorida ( $CCl_4$ ). Terjadi penurunan ukuran butir pada paduan AZ91E hingga 0,08% berat. Penambahan partikel  $Al_4C_3$  pada saat peleburan ke dalam Magnesium murni sebesar 0,5% berat menunjukkan perubahan ukuran butir secara signifikan. Ukuran butir menjadi sama dan selanjutnya penambahan di atas 0,5% berat tidak menyebabkan penurunan lagi dalam ukuran butir.

Xue dkk. (Xue et al., 2005) melakukan penelitian dengan menambahkan serbuk  $Al_4C_3$  pada paduan Mg-Al menghasilkan efektifitas yang besar, terjadi pengurangan ukuran butir hingga 60%. Penambahan partikel  $Al_4C_3$  langsung pada saat peleburan lebih efektif dibandingkan pembentukan partikel dengan penambahan karbon. Aluminium berikatan dengan karbon membentuk partikel  $Al_4C_3$ . Karbon berasal dari pengotor yang ada saat logam dalam keadaan cair. Partikel-partikel yang terbentuk tersebut menyebabkan terjadinya efek penghalusan butir pada matrik  $\alpha$ -Mg.

Kalsium (Ca) adalah elemen padu yang relatif murah dengan densitas yaitu  $1,55 \text{ g/cm}^3$  yang juga rendah seperti densitas Magnesium yaitu  $1,74 \text{ g/cm}^3$  dimana dapat menjaga sifat spesifik dari paduan Magnesium, yang sangat berguna untuk meningkatkan sifat mekanik dalam paduan dasar Mg-Al pada temperatur tinggi karena penambahan kalsium akan membentuk senyawa intermetalik seperti  $Al_2Ca$  dan  $Mg_2Ca$  yang dimana memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi dan juga dapat menghaluskan ukuran butir. (Rokhlin et al., 2009)(Jun et al., 2005). Penggunaan kalsium dalam paduan Magnesium adalah saat akan dilakukan penuangan yang bertujuan untuk mengurangi oksidasi pada saat proses peleburan.

Penambahan kalsium memberikan efek cukup signifikan dalam menurunkan ukuran butir pada Magnesium murni seperti diperlihatkan pada Gambar 3. Pada penambahan Ca sebesar 0.8 % berat menunjukkan pada bagian tengah terjadinya penghalusan butir semula  $1000 \mu\text{m}$  (tanpa penambahan Ca) menjadi sekitar  $250 \mu\text{m}$ . Efek penghalusan butir dari kalsium disebabkan oleh tingginya nilai *Growth Restriction Factor* (Lee et al., 2000). Semakin besar nilai GRF maka penghambatan pertumbuhan butir akan semakin tinggi. Nilai GRF kalsium adalah 11.94, nilai ini menunjukkan kemampuan segregasi yang tinggi dari kalsium (Z. Jiang, Jiang, Yang, et al., 2015). Nilai GRF yang tinggi akan mengurangi suhu *undercooling* antar padatan dan lelehan dengan pembentukan lapisan pembatas difusi yang menghambat pertumbuhan butir, sehingga mendorong pertumbuhan inti pada lelehan. Namun, ukuran butir mencapai jenuh pada  $270 \mu\text{m}$  dengan 0,4 wt% Ca untuk paduan Mg-Ca, dan penambahan selebihnya hanya memberikan sedikit pengaruh pada besar butir (Lee et al., 2000).

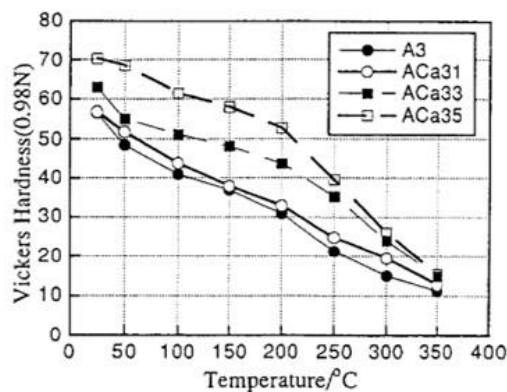


Gambar 3. Pengaruh Kalsium (Ca) pada Magnesium Murni (Lee et al., 2000)

Penambahan kalsium sebanyak 1% pada paduan Mg-Al akan mendorong pembentukan fasa  $Al_2Ca$  pada batas butir dan akan mengurangi pertumbuhan fasa  $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$ . Saat penambahan Ca ditingkatkan hingga 4%, fasa  $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$  menghilang, dan fasa  $Al_2Ca$  bertambah dengan pembentukan fasa baru  $Mg_2Ca$  (Wu et al., 2005).

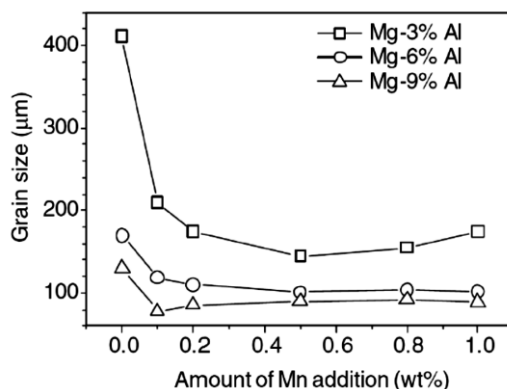
Dalam penelitian yang dilakukan dengan merujuk penelitian lain bahwa senyawa yang diinginkan adalah intermetalik  $Al_2Ca$  karena meningkatkan nilai kekerasan dalam berbagai temperatur dari paduan Magnesium sehingga dapat diaplikasikan untuk bidang otomotif. Penambahan elemen Ca dalam paduan AZ91, dapat menurunkan jumlah fasa  $Mg_{17}Al_{12}$  dan meningkatkan pembentukan fasa  $Al_2Ca$  (Qudong et al., 2001)

Fasa  $Al_2Ca$  memiliki kestabilan pada suhu tinggi. Kecenderungan pertumbuhan fasa  $Al_2Ca$  juga menekan pertumbuhan fasa  $\beta-Mg_{17}Al_{12}$  yang mampu mengurangi kestabilan pada suhu tinggi (Qudong *et al.*, 2001), (Rokhlin *et al.*, 2006). Fasa  $Al_2Ca$  akan terbentuk saat kadar kalsium lebih dari 0,1 wt%, pada paduan Mg-Al, namun hanya pada rasio kalsium-aluminium dibawah 0,8 (Baldwin, 2004). Pada penelitian yang dilakukan oleh Ninomiya, penambahan elemen Al dan Ca dengan rasio mendekati Ca 0,8 dari Al, memberikan peningkatan kestabilan sifat mekanik pada suhu 100-200° C. Gambar 4 memperlihatkan hasil penelitian paduan ACa3x, dengan rasio Al-Ca tersebut, memiliki *heat resistant temperature* di suhu 282° C. Paduan ACa35 juga menunjukkan pengurangan nilai kekerasan yang rendah pada suhu 350° C, yaitu sebesar 5 HV dari 68 HV.



Gambar 4. Pengaruh Penambahan Elemen Ca Terhadap Nilai Kekerasan (Ninomiya *et al.*, 1995)

Efisiensi penghalusan butir oleh Mn meningkat dengan naiknya kandungan aluminium. Ini terjadi karena senyawa Al-Fe-Mn merupakan senyawa yang memiliki potensi yang besar sebagai pembentuk inti (nukleasi). (Cao, P. 2006). Gambar 5. memperlihatkan penambahan % berat Mn pada paduan Mg-Al mempengaruhi ukuran besar butir. Semakin besar Al yang ditambahkan menghasilkan penghalusan ukuran butir. Pada paduan Mg- 9% berat Al dengan penambahan Mn 1 % berat, ukuran butir yang dihasilkan dibawah 100  $\mu m$ . Penambahan 0,81 – 0,91 % berat Mn pada Paduan Mg-RE akan meningkatkan Kekuatan Tarik (Du.J 2007)



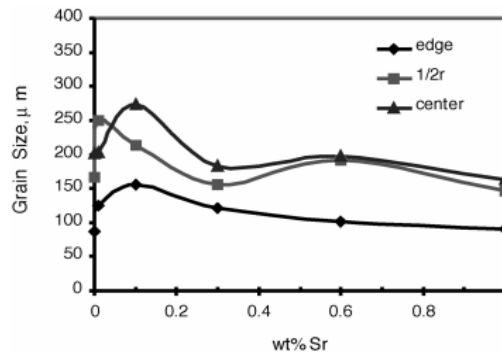
Gambar 5. Pengaruh Mn terhadap ukuran butir (T.A. Leil, 2009).

Seng (Zn) merupakan elemen paduan utama paling banyak digunakan pada Magnesium setelah aluminium karena mempunyai kelarutan yang sangat baik dalam Magnesium. Kelarutan maksimum Zn dalam Mg pada temperatur 345°C adalah sebesar 6,2%. Kelarutan pada temperatur kamar sebesar 2%, sehingga kelebihan Zn akan membentuk senyawa intermetalik  $Mg_{51}Zn_{20}$  yang sangat keras dan getas. Penambahan Zn dapat pula meningkatkan fluiditas, tetapi dalam jumlah yang lebih besar akan menyebabkan terjadinya cacat retak panas. (Ramachandran *et al.*, 2008)

Lee dkk, melakukan penambahan 2% ZnO pada paduan Magnesium AZ91E dengan temperatur pencairan dan pengadukan selama 30 detik dihasilkan penurunan besar butir sebesar 75% (Al-tib *et al.*, 2011). Penampahan hingga 3 % ZnO pada paduan Mg-3% Zn dapat menurunkan ukuran butir rata-rata dari 1100  $\mu m$  (tanpa penambahan ZnO) menjadi 410  $\mu m$ . (Fu *et al.*, 2008)

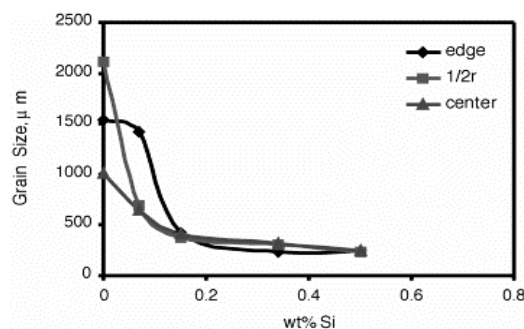
Kelarutan Sr (Stronsium) 0,11% di dalam Mg dapat menyebabkan terjadinya penghalusan butir. Kelarutan yang rendah ini memungkinkan Sr untuk memperkaya cairan di depan antarmuka padatan yang menyebabkan terhalangnya pertumbuhan butir (Yang *et al.*, 2008). Ditemukan adanya konsentrasi partikel Sr disekeliling batas butir yang menghalangi pelarutan. Selain itu, ditemukan juga partikel di tengah butir yang kaya akan Al, Fe, Mn, Mg, dan Sr. Terdapat senyawa intermetalik Al-Fe-Mn yang bertindak sebagai tempat nukleasi penghalusan butir pada

temperatur tinggi. Sehingga diusulkan bahwa senyawa Al-Fe-Mn dan Mg-Sr mengendap dari fasa cair, kemudian bergabung untuk membentuk partikel nukleasi heterogen (Pan., Y., Liu., X. and Yang, 2007). Gambar 6. memperlihatkan penambahan 1 % berat Sr pada Magnesium pada sampel di bagian tengah hasil analisa pengukuran ukuran butir menghasilkan penghalusan butir yang semula sekitar 275  $\mu\text{m}$  menjadi sekitar 180  $\mu\text{m}$ .



Gambar 6. Penambahan Sr paduan Mg-9Al terhadap ukuran butir. (Pan., Y., Liu., X. and Yang, 2007)

Silikon merupakan elemen paduan yang umum digunakan pada paduan Magnesium. Silikon berbentuk chips ditambahkan ke dalam Magnesium cair pada 700°C, kemudian diaduk untuk melarutkan silikon dengan sempurna. Hasil pengukuran butir seperti ditunjukkan pada **Gambar 7**. memperlihatkan penambahan Silikon dalam % berat yang jumlahnya kecil berpengaruh besar terhadap penurunan ukuran butir Magnesium murni pada sampel di bagian tengah yang semula 1000  $\mu\text{m}$  setelah di tambahkan 0,5 & berat Si menjadi 250  $\mu\text{m}$ . Ini menunjukkan bahwa silikon merupakan elemen yang efektif dalam menghaluskan butir Magnesium (Lee *et al.*, 2000).



Gambar 7. Pengaruh penambahan Silikon (Si) pada Magnesium (Lee *et al.*, 2000)

Karbon yang berikatan dengan silika akan membentuk senyawa karbida yang memiliki sifat mekanik yang tinggi, sehingga pengembangan paduan Magnesium dengan menambahkan senyawa karbida akan memiliki kekuatan tarik, ketahanan mulur, kekerasan, dan ketahanan aus yang tinggi serta koefisien ekspansi panas yang rendah. Penambahan 0,1 hingga 0,5% berat SiC dapat meningkatkan kekuatan luluh dan kekuatan tarik secara signifikan dari 104 MPa dan 174 MPa menjadi 124 MPa dan 216 MPa. Peningkatan sifat mekanik ini dikarenakan adanya senyawa karbida SiC memberikan efek terhadap terbentuknya butir yang halus (Wang, Z., Kang, Y., Dong, W., Zhao, H., Liu, J. and Xu, 2005). Penambahan SiC nanopartikel pada AZ91 memberikan dampak menghambat pertumbuhan butir, dapat meningkatkan kemampuan deformasi dari paduan komposit SiC/AZ91. (Nie *et al.*, 2018)

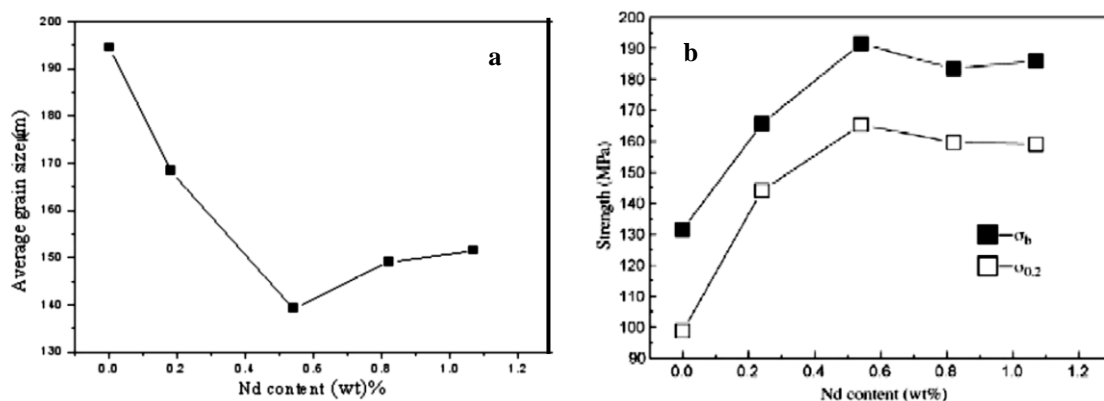
Paduan AZ91 dengan penambahan partikel nano SiC kurang dari 2% dapat meningkatkan kekuatan, keuletan dan kemampuan coranya. SiC terdispersi dengan membentuk kluster-kluster pada matrik Mg-4Zn. Terbentuk pula fasa intermetalik MgZn<sub>2</sub> disekitar kluster SiC. SiC bertindak sebagai katalis terjadinya pengintian. Demikian pula untuk paduan Mg-6Zn dan Mg-8Zn, terjadi peningkatan kekuatan dan keuletannya, terbentuk fasa kedua Mg<sub>7</sub>Zn<sub>3</sub> dan Mg<sub>2</sub>Zn<sub>3</sub>. (De Cicco *et al.*, 2009)

Zirkonium merupakan elemen paduan yang mempunyai sifat sebagai penghalus butir terbaik. Sejumlah kecil zirkonium dapat meningkatkan penghalusan butir dan berpengaruh terhadap sifat mekanik paduan Magnesium. Penguatan ini disebabkan oleh ukuran parameter kisi dari zirkonium (a=0.323 nm, c=0.514 nm) mendekati ukuran parameter kisi Magnesium. Partikel-partikel yang kaya akan zirkonium akan menyediakan tempat untuk terjadinya pengintian heterogen butir-butir Magnesium selama proses pembekuan (Saha & Dissertation, 2010).

Penghalusan butir pada paduan Magnesium dapat dilakukan dengan menggunakan paduan utama Mg-Zr (*master alloys*). Berkaitan dengan batas kelarutan zirkonium yang rendah dalam Magnesium, sehingga umumnya zirkonium berada sebagai partikel terisolasi atau sebagai kelompok partikel. Saat ini, di pengecoran, sekitar 1% berat

zirkonium ditambahkan sebagai penghalus butir. Qian dkk. (Qian *et al.*, 2003) menambahkan 1% berat zirkonium dalam bentuk paduan master Zirmax® (Mg-33,3% Zr) ke dalam cairan Magnesium murni pada 730°C dan 780°C. Dari pengamatan struktur mikro terlihat bahwa partikel zirkonium yang tidak larut berbentuk partikel atau sebagai kelompok besar dengan ukuran  $\geq 10 \mu\text{m}$ . Kelompok-kelompok ini tidak turut dalam proses penghalusan butir dan berada di bagian bawah krusibel. Perilaku endapan partikel zirkonium ditentukan oleh distribusi ukuran partikel awal paduan utamanya.

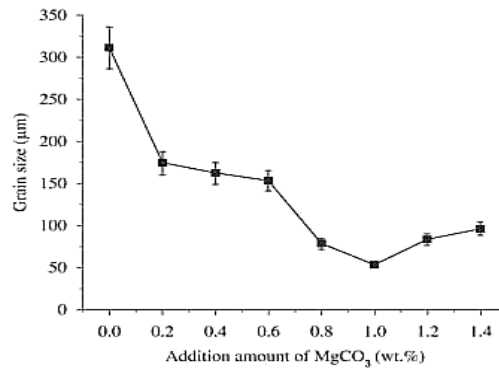
Logam tanah jarang seperti Cerium (Cr), Lanthanum (La), Praseodymium (Pd), Neodymium (Nd), Thorium (Th), Yttrium (Y) dan Scandium (Sc), Zirkonium (Zr) merupakan elemen logam yang banyak diteliti sebagai elemen aditif pada paduan Magnesium. Gambar 8. memperlihatkan pengaruh penambahan Neodymium (Nd) terhadap peningkatan kekuatan, optimum pada penambahan 0,6% berat Nd. Sifat mekanik paduan Magnesium tergantung adanya kelarutan elemen logam tanah jarang yang menghasilkan senyawa fasa intermetalik Mg-Zn-RE (Azad, 2012). Fasa intermetalik dapat menyebabkan ketahanan mulur yang baik pada temperatur tinggi. Penggunaan paduan secara komersial masih relatif sedikit seperti ZE10 (Mg-1.25Zn-0.2Ce-MM), WE43 (Mg-4Y-3Nd-0.5Zr) dan WE54 (Mg-5Y-3.5Nd-0.5Zr) disebabkan oleh harganya yang sangat mahal. (Lv *et al.*, 2013)(Rzychoń & Kielbus, 2006). Logam tanah jarang Cerium (Ce) jika ditambahkan pada magnesium AZ91 dapat menghasilkan penghalusan butir. mengurangi fraksi fasa  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ , membentuk senyawa intermetalik  $\text{Al}_4\text{Ce}$ , Ketika %Ce lebih tinggi, kondisi termodinamika dan kinetik pembentukan fasa  $\text{Al}_4\text{Ce}$  lebih tinggi sehingga meningkatkan proporsi fasa  $\text{Al}_4\text{Ce}$  yang tumbuh menjadi strip dan jarum. Pembentukan fasa  $\text{Al}_4\text{Ce}$  membuat reaksi eutektik berkurang, sehingga jumlah fasa  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  menurun dan  $\text{Al}_4\text{Ce}$  meningkat secara bersamaan (CAI *et al.*, 2016)



Gambar 8. (a) Pengaruh Nd Terhadap Ukuran Butir; (b) Pengaruh Nd Terhadap Kekuatan (Vinotha *et al.*, 2009).

Penambahan elemen Y 0.5 s.d. 2 % berat pada paduan AZ91D meningkatkan kekuatan luluh dan kekuatan tarik serta elongation dari AZ91D tanpa tambahan Y. Dengan proses lanjut berupa ekstrusi pada temperatur 300°C tetap menunjukkan kenaikan UTS (*Ultimate Tensile Strength*), YS (*Yield Strength*) dan *Elongation*, namun jika temperatur ekstrusi di variasikan dari 250, 300, 325, 350 dan 450 menunjukkan sifat mekanik berubah dengan bervariasi. Jika temperatur ekstrusi dinaikkan dari 250 s.d 400 maka UTS dan YS akan turun sebaliknya nilai elongasi akan meningkat. Ini menunjukkan bahwa meningkatnya temperatur ekstrusi akan berdampak negatif pada sifat UTS dan YS namun berbanding terbalik dengan elongasinya. (Zhao *et al.*, 2009)

Penambahan  $\text{MgCO}_3$  pada AZ91 memberikan pengaruh yang besar terhadap penghalusan butir. Gambar 9. memperlihatkan penambahan 1,2%  $\text{MgCO}_3$  pada AM60B memberikan penghalusan butir yang paling tinggi dari ukuran awal (tanpa pemaduan) sebesar  $348 \mu\text{m}$  menjadi  $69 \mu\text{m}$ . Terjadi penurunan ukuran butir lebih dari 5 kali. Peningkatan ini terjadi karena adanya dekomposisi  $\text{MgCO}_3$  menjadi MgO dan  $\text{CO}_2$ , gas  $\text{CO}_2$  akan bereaksi dengan Mg membentuk MgO dan kemudian C bereaksi dengan Al membentuk partikel  $\text{Al}_4\text{C}_3$  sebagai presipitat. (Chen *et al.*, 2012).


 Gambar 9. Pengaruh Penambahan MgCO<sub>3</sub> Terhadap Ukuran Besar Butir pada AM60B (Chen et al., 2012)

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil telaah jurnal tentang pengaruh elemen penambah pada paduan Magnesium diperoleh bahwa elemen utama penambah di dominasi oleh elemen yang secara berurutan digunakan mulai dari yang paling banyak di tambahkan elemen murni adalah Aluminium (Al), Seng (Zn), Kalsium (Ca), Zirkonium (Zr) dan logam tanah jarang/*Rear Earth* (RE) kemudian elemen senyawa SiC, ZnO, MgO<sub>3</sub>, TiB<sub>2</sub> dan TiC yang kesemuanya bertujuan untuk memperbaiki sifat guna memenuhi kriteria pada aplikasinya.

Karakteristik paduan Magnesium dipengaruhi oleh penambahan elemen dan proses pembuatan yang ditentukan oleh beberapa parameter diantaranya pemilihan jenis elemen/senyawa dan proses (pengeroran, tempa, perlakuan panas). Penelitian yang sudah dilakukan diantaranya penelitian tentang pengaruh elemen/senyawa terhadap karakteristik paduan Magnesium telah dilakukan beberapa peneliti. Tabel 5. menunjukkan rangkuman dari penelitian yang telah dilakukan pada paduan Magnesium dengan penambahan elemen/senyawa terhadap peningkatan sifat diantaranya penghalusan ukuran butir, peningkatan kekuatan, keuletan, kekerasan, ketahanan mulur dan ketahanan terhadap temperature tinggi. Penambahan elemen paduan pada Magnesium secara keseluruhan menyebabkan terjadinya penghalusan ukuran butir mencapai 70 – 90 %, yang dapat mempengaruhi karakteristik sifat yang lain.

Tabel 5. Rangkuman Pengaruh Penambahan Elemen Terhadap Perubahan Sifat Paduan Magnesium.

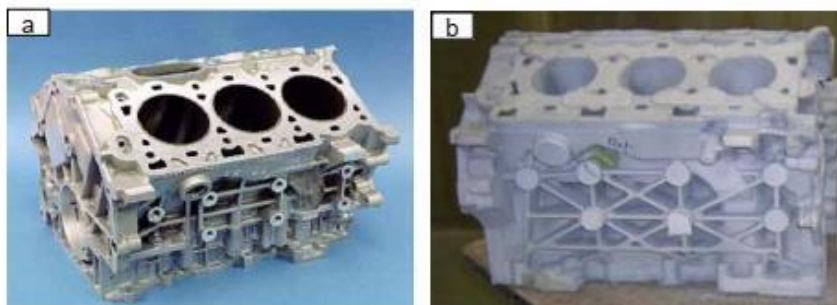
Elemen/ Senyawa	Penghalusan butir	Kekuatan	Keuletan	Kekerasan	Ketahanan Mulur	Ketahanan Temp. Tinggi	Referensi
Al	√	√	√				Pan, 2005
Mn	√	√					Ning, 2007
Ti	√ + B		√				Wang, 2006
Zn		√	√	√			Balasubraman i, 2009
Ca	√	√	√		√	√ + RE	Qudong, 2001
Sr	√						Kainer, 2007
Si	√			√	√		Asano, 2008
Sb + Ce	√	√	√				Liu, 2009
Zr	√	√					Saha, 2010
Sc+Mn+Gd				√	√		Qingchun, 2011
Gd+Y+ Zn		√			√	√	B. Jiang, 2010
Y	√	√	√				Zhao, 2009
C	√						Motegi, 2005
Cu		√	√				Zhiyong, 2012
Sn		√			√		Antipas, 2013
MgO <sub>3</sub>	√	√					Chen, 2011
Sb	√	√			√		Yang, 2009
RE		√			√		You , 2017
SiC	√			√			Wang, 2005
ZnO	√						Fu et al., 2008

Magnesium dengan jumlahnya yang cukup melimpah di bumi setelah aluminium dan besi menjadi salah satu logam yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi baik struktural maupun non-struktural. Penggunaan terbesar paduan Magnesium adalah Mg-Al, dengan penambahan kandungan aluminium akan meningkatkan kekuatan dan ketahanan korosi dari Magnesium. Proses pembuatan paduan Magnesium yang paling banyak adalah hasil *die casting* yang dimanfaatkan dalam industri otomotif. Selain itu, Magnesium juga banyak digunakan untuk desulfurisasi besi dan baja serta penggunaan lainnya seperti pelat (*plate*) dan lembaran (*sheet*) Magnesium (Mayer Kuts, 2006)

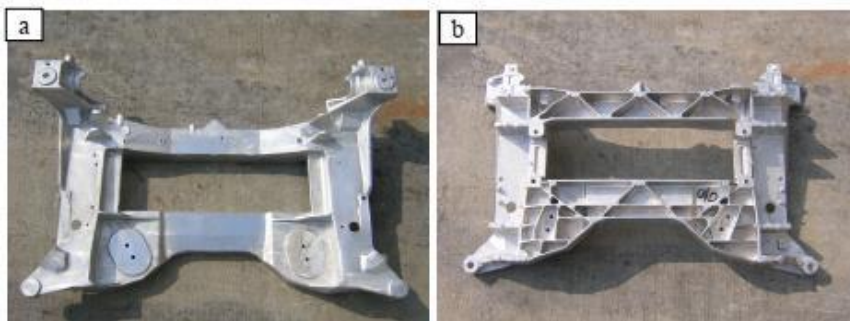


Magnesium merupakan logam yang memiliki sifat-sifat menarik sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi struktural. Beratnya yang begitu ringan serta massa jenis yang rendah sangat cocok digunakan pada komponen dengan mobilitas tinggi. Sifat utama Magnesium yang menjadi dasar pemanfaatan struktural adalah masa jenis yang rendah diaplikasikan sebagai komponen mesin otomotif dan *aerospace*, sebagai kerangka komputer dan kamera serta peralatan olahraga sebagai contoh yaitu busur panah (Yang *et al.*, 2008). Penggunaan struktural lainnya dari Magnesium yaitu sebagai komponen pesawat terbang, komponen rudal, peredam suara perangkat elektronik, *hydrogen storage*, kaleng penyimpanan bahan bakar nuklir serta sebagai bahan pembuat koper karena sifat Magnesium yang tahan terhadap benturan. Magnesium dapat dengan mudah difabrikasi melalui berbagai proses pembentukan yang sederhana, seperti proses coran, tempa, ekstrusi dan *injection molding (thixocasting)*. Beberapa contoh sebagai hasil pengembangan paduan magnesium untuk aplikasi struktur ringan diperlihatkan pada Gambar 10 dan Gambar 11.

Magnesium berada di salah satu urutan terbawah dalam deret volta (Nerst) sehingga sering digunakan sebagai anoda korban untuk melindungi baja dari korosi. Contohnya, Magnesium sebagai anoda korban digunakan untuk melindungi pipa bawah tanah, melindungi bagian dalam *water heater*, sebagai pelindung lambung kapal serta melindungi baja yang berada dalam lingkungan air laut (Mayer Kuts, 2006). Magnesium juga dapat ditambahkan pada besi cor kelabu, dimana serpihan karbon (grafit) berkumpul membentuk bulatan sehingga menghasilkan besi cor dengan grafit berbentuk bulat/nodular yang bersifat ulet dan retak coran pun berkurang. Hal ini menjadikan besi cor nodular memiliki kekuatan yang setara dengan baja.



Gambar 10. (a) dan (b) Blok silinder *Duratec 2,5L* berbahan paduan magnesium (Carpenter *et al.*, n.d.).



Gambar 11. Komponen *Cradle* yang terbuat dari paduan magnesium hasil pengecoran.  
(a) Tampak bagian atas *Cradle* untuk *Corvette 2006*, (b) Tampak bagian bawah (Carpenter *et al.*, n.d.).

### Kesimpulan

Magnesium merupakan logam ultra ringan yang potensial dapat diaplikasikan dengan pengurangan rasio berat. reduksi berat Mg terhadap baja karbon rendah dapat mencapai 55-60%. Penambahan elemen/senyawa sangat efektif untuk meningkatkan kekuatan dan keuletan paduan Mg. Perubahan ukuran struktur butir/penghalusan butir akibat penambahan elemen/senyawa dapat memperbaiki sifat mekanik. Mekanisme penghalusan ukuran besar butir dan pembentukan presipitat dapat pula diperoleh melalui proses pembentukan (*forging, die casting, rolling, extrusion*) dan perlakuan panas (*solid solution treatment*). Karena daktilitas dan ketahanan korosi berbanding terbalik dengan kekuatan, dan sulit untuk mengoptimalkan ketiganya pada saat yang sama, sulit untuk mengembangkan metoda untuk memproduksi Magnesium di dunia. Para peneliti telah melakukan berbagai penelitian dengan gagasan baru untuk memberikan dukungan dasar guna mengoptimalkan kemampuan paduan Mg sesuai yang diinginkan.

Perkembangan penelitian paduan Mg sebagai bahan dasar dan juga ilmu terapan baik dari segi modifikasi, mechano-fisik, termal dan sifat lainnya dari industri struktural maupun non struktural yang memanfaatkan logam ringan sebagai pertimbangan ratio pengurangan dari berat komponen terus dikembangkan. Kajian ini merupakan informasi singkat tentang pengembangan metode penambahan elemen/senyawa pada paduan magnesium, yang akan

berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang faktor-faktor yang mengendalikan sifat mekanik dan memberikan pandangan penelitian masa depan di bidang ini. Potensi pengembangan penelitian berbasis dasar Magnesium sangat besar karena disamping dapat mereduksi berat dengan ratio diatas 60 % dengan kekuatan yang dapat ditingkatkan setara dengan logam ferro pada kendaraan sehingga akan menurunkan emisi gas buang, menghemat energi dan menurunkan pencemaran lingkungan.

### Daftar Pustaka

- Aghion, E., & Bronfin, B. (2004). *Magnesium Alloys: Science, Technology and Applications*. January.
- Al-tib, W., Additions, Z., & Lee, K. (2011). *a Study on Grain Refinement of AZ91E Magnesium Alloy*.
- Antipas, G. (2013). The Effect of Increasing Sn Content on High-Temperature Mechanical Deformation of an Mg-3%Cu-1%Ca Alloy. *Metals*. <https://doi.org/10.3390/met3040337>
- Asano, K., & Yoneda, H. (2008). High Temperature Properties of AZ91D Magnesium Alloy Composite Reinforced with Short Alumina Fiber and Mg<sub>2</sub>Si Particle. *Materials Transactions*, 49(7), 1688–1693. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MER2008092>
- ASM International. (1992). *ASM Metals Handbook Vol.2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*.
- Azad, A. (2012). *Grain refinemnet of magnesium alloy AZ91E*. April, 101.
- Balasubramani, N. (2009). *STUDIES ON GRAIN REFINEMENT AND ALLOYING ADDITIONS ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Mg-8Zn-4Al ALLOY*.
- Baldwin, W. (2004). *ASM Handbook : Metallography and Microstructures*. 9.
- CAI, H., GUO, F., REN, X., SU, J., & CHEN, B. (2016). Effects of cerium on as-cast microstructure of AZ91 magnesium alloy under different solidification rates. *Journal of Rare Earths*, 34(7), 736–741. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60085-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60085-6)
- Carpenter, J. A., Jackman, J., Li, N., Osborne, R. J., Powell, B. R., & Sklad, P. (n.d.). *Automotive Mg Research and Development in North America*. <http://www.scientific.net>
- Chen, T. J., Jiang, X. D., Ma, Y., Wang, R. Q., & Hao, Y. (2011). Grain refinement of AZ91D magnesium alloy by MgCO<sub>3</sub>. *Materials Research*, 14(1), 124–133. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000017>
- Chen, T. J., Wang, R. Q., Huang, H. J., Ma, Y., & Hao, Y. (2012). Grain refining technique of AM60B magnesium alloy by MgCO<sub>3</sub>. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 22(7), 1533–1539. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61352-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61352-6)
- De Cicco, M., Konishi, H., Cao, G., Choi, H. S., Turng, L. S., Perepezko, J. H., Kou, S., Lakes, R., & Li, X. (2009). Strong, ductile magnesium-zinc nanocomposites. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 40(12), 3038–3045. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-0013-0>
- Distribution, F. O. R. (n.d.). *A NORTH AMERICAN AUTOMOTIVE STRATEGIC VISION FOR MAGNESIUM M A G N E S I U M V I S I O N 2 0 2 0 :*
- Esmaily, M., Svensson, J. E., Fajardo, S., Biribilis, N., Frankel, G. S., Virtanen, S., Arrabal, R., Thomas, S., & Johansson, L. G. (2017). Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion. In *Progress in Materials Science*. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.04.011>
- Fu, H. M., Qiu, D., Zhang, M. X., Wang, H., Kelly, P. M., & Taylor, J. A. (2008). The development of a new grain refiner for magnesium alloys using the edge-to-edge model. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.02.076>
- James, M., Kihuu, J. M., Rading, G. O., & Kimotho, J. K. (2011). Use of magnesium alloys in optimizing the weight of automobile: Current trends and opportunities. *Sustainable Research and Innovation Conference Proceedings*, 3, 4–6.
- Jiang, B., Qiu, D., Zhang, M. X., Ding, P. D., & Gao, L. (2010). A new approach to grain refinement of an Mg-Li-Al cast alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 492(1–2), 95–98. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.11.066>
- Jiang, Z., Jiang, B., Yang, H., Yang, Q., & Dai, J. (2015). *In fl uence of the Al 2 Ca phase on microstructure and mechanical properties of Mg e Al e Ca alloys*. 647, 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.06.060>
- Jiang, Z., Jiang, B., Zhang, J., Xia, X., & Pan, F. (2015). *Microstructural Evolution of Mg-4Al-2 . 5Ca Alloy during Solidification*. 816, 486–491. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.816.486>
- Jun, J. H., Park, B. K., Kim, J. M., Kim, K. T., & Jung, W. J. (2005). Effects of Ca addition on microstructure and mechanical properties of Mg-RE-Zn casting alloy. *Magnesium - Science, Technology and Applications*, 488–489, 107–110. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.488-489.107>
- Kainer, K. U. (2007). *Magnesium : proceedings of the 7th International Conference Magnesium Alloys and their Applications*. Wiley-VCH.
- Kardys, G. (2017a). *Magnesium Car Parts : A Far Reach for Manufacturers? Part 1*.
- Kardys, G. (2017b). *Magnesium Car Parts: Cost Factors (Part 2)*.
- Kawamura, Y. (2010). *Not journal Article Japan Technology : Ultralight Magnesium Alloy*. 28–29.
- Kojima, Y. (2001). Project of platform science and technology for advanced magnesium alloys. In *Materials*

- Transactions* (Vol. 42, Issue 7, pp. 1154–1159).
- Krisnawan, A. U. (2009). *Karakterisasi Sampel Paduan Magnesium AZ91D dengan berbagai Variasi waktu Milling Menggunakan XRF dan XRD*.
- Lee, Y. C., Dahle, A. K., & Stjohn, D. H. (2000). The role of solute in grain refinement of magnesium. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 31(11), 2895–2906. <https://doi.org/10.1007/BF02830349>
- Liu, S. F., Li, B., Wang, X. H., Su, W., & Han, H. (2009). Refinement effect of cerium, calcium and strontium in AZ91 magnesium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8), 3999–4004. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.020>
- Lv, B., Peng, J., Peng, Y., & Tang, A. (2013). The effect of addition of Nd and Ce on the microstructure and mechanical properties of ZM21 Mg alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 1(1), 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2013.02.011>
- Mayer Kuts. (2006). *Material and Mechanical Design “Mechanical Engineer’s Handbook.”* John Willey & Sons, Inc.
- Mordike, B. L., & Ebert, T. (2001). Magnesium Properties - applications - potential. *Materials Science and Engineering A*, 302(1), 37–45. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01351-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01351-4)
- Motegi, T. (2005). *Grain-refining mechanisms of superheat-treatment of and carbon addition to Mg – Al – Zn alloys.* 414, 408–411. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.214>
- Nie, K., Kang, X., Deng, K., Wang, T., & Guo, Y. (2018). *Effect of SiC Nanoparticles on Hot Deformation Behavior and Processing Maps of Magnesium Alloy AZ91.* <https://doi.org/10.3390/nano8020082>
- Ning, Z., Cao, P., Wang, H., Sun, J., & Liu, D. (2007). Effect of Cooling Conditions on Grain Size of AZ91 Alloy. *J. Mater. Sci. Technol*, 23(5).
- Ninomiya, R., Ojiro, T., Kubota, K., & Mining, M. (1995). *IMPROVED HEAT RESISTANCE OF Mg-Al ALLOYS BY THE Ca ADDITION Mg-3Al Mg-3Al Mg-6Al Mg-6Al Mg-9Al Mg-9Al.* 43(2).
- Nordlien, J. H., Ono, S., Masuko, N., & Nisancioglu, K. (1997). A tem investigation of naturally formed oxide films on pure magnesium. *Corrosion Science*, 39(8), 1397–1414. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(97\)00037-1](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(97)00037-1)
- Pan., Y., Liu., X. and Yang, H. (2007). Sr Microalloying for Refining Grain Size of AZ91D Magnesium Alloy. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science, Edition 22*, pp 74-76.
- Pan, Y., Liu, X., & Yang, H. (2005). Role of C and Fe in Grain Refinement of an AZ63B Magnesium Alloy by Al-C Master Alloy. *J. Mater. Sci. Technol*, 21(6).
- Qian, M., Stjohn, D. H., & Frost, M. T. (2003). Zirconium Alloying and Grain Refinement of Magnesium alloys. *Magnesium Technology 2003, October*, 209–214. <https://drive.google.com/open?id=0B0fTxDBXtHZMWmRPVlg1WVJLODQ>
- Qingchun, X., Jing, Z., Haicheng, P., Lina, H., & Rongde, L. (2011). Effects of scandium and zirconium combination alloying on as-cast microstructure and mechanical properties of Al-4Cu-1.5Mg alloy. In *China Foundry* (Vol. 8, Issue 1, pp. 137–140).
- Qudong, W., Wenzhou, C., Xiaoqin, Z., & Yizhen, L. U. (2001). *Effects of Ca addition on the microstructure and mechanical properties of AZ91magnesium alloy.* 6, 3035–3040.
- Ramachandran, T. R., Sharma, P. K., & Balasubramanian, K. (2008). Grain refinement of light alloys. *68th World Foundry Congress*, 189–193. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79957972949&partnerID=tZOtx3y1>
- Rokhlin, L. L., Dobatkina, T. V., Nikitina, N. I., & Tarytina, I. E. (2009). Calcium-alloyed magnesium alloys. *Metal Science and Heat Treatment*, 51(3–4), 164–169. <https://doi.org/10.1007/s11041-009-9127-7>
- Rokhlin, L. L., Nikitina, N. I., & Volchenkova, V. A. (2006). Magnesium-rich Mg-Al<sub>2</sub>Ca alloys. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2006(2), 185–188. <https://doi.org/10.1134/S0036029506020157>
- Rzychoń, T., & Kielbus, a. (2006). Effect of rare earth elements on the microstructure of Mg-Al alloys. *Manufacturing Engineering*, 17(1), 149–152.
- Saha, P., & Dissertation, A. (2010). *AN ANALYSIS OF THE GRAIN REFINEMENT OF MAGNESIUM BY ZIRCONIUM.*
- Song, C., Han, Q., & Zhai, Q. (2009). Review of grain refinement methods for as-cast microstructure of magnesium alloy. In *China Foundry* (Vol. 6, Issue 2, pp. 93–103).
- Song, G.-L. (2011). Corrosion electrochemistry of magnesium (Mg) and its alloys. In *Corrosion of Magnesium Alloys*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857091413.1.3>
- Tushadi. (1990). *Analisa Penyebaran dolomit di Indonesia.*
- USAMP. (2006). *Magnesium Vision 2020: A North American Automotive Strategic Vision for Magnesium.*
- Vinotha, D., Raghukandan, K., Pillai, U. T. S., & Pai, B. C. (2009). Grain refining mechanisms in magnesium alloys - An overview. In *Transactions of the Indian Institute of Metals*. <https://doi.org/10.1007/s12666-009-0088-8>
- Wang, Y., Zeng, X. and Ding, W. (2006). Effect of Al-4Ti-5B Master Alloy on the Grain Refinement of AZ31 Magnesium Alloy. *Scripta Materialia*, 54, pp 269-273.

- Wang, Z., Kang, Y., Dong, W., Zhao, H., Liu, J. and Xu, Y. (2005). Study of Grain Refinement and SiC Nanoparticle Reinforced Magnesium Alloy. *Material Science Forum*, 488–489, 889–892.
- Watarai, H. (2006). Trend of Research and Development for Magnesium Alloys-Reducing the Weight of Structural Materials in Motor Vehicles. *Science & Technology Trends, Quarterly*(2), 84–97.
- Wu, G., Fan, Y., Gao, H., Zhai, C., & Zhu, Y. P. (2005). The effect of Ca and rare earth elements on the microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of AZ91D. *Materials Science and Engineering A*, 408(1–2), 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.011>
- Xue, F., Du, W., Sun, Y., & Science, M. (2005). *Microstructure Refinement of Magnesium Based Alloy*. 489, 143–146. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.488-489.143>
- YANG, M. bo, PAN, F. sheng, SHEN, J., & BAI, L. (2009). Comparison of Sb and Sr on modification and refinement of Mg<sub>2</sub>Si phase in AZ61-0.7Si magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 19(2), 287–292. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60266-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60266-6)
- Yang, Z., Li, J. P., Zhang, J. X., Lorimer, G. W., & Robson, J. (2008). Review on Research and Development of Magnesium Alloys. *Acta Metall. Sin.(Engl. Lett)*, 21(5), 313–328. [https://doi.org/10.1016/S1006-7191\(08\)60054-X](https://doi.org/10.1016/S1006-7191(08)60054-X)
- Yano, E., Tamura, Y., Motegi, T., & Sato, E. (2003). Effect of Carbon Powder on Grain Refinement of an AZ91E Magnesium Alloy \* 1. *Materials Transaction*, 44 No 1, 107 to 110.
- You, S., Huang, Y., Kainer, K. U., & Hort, N. (2017). Recent research and developments on wrought magnesium alloys. In *Journal of Magnesium and Alloys*. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.09.001>
- Zhao, Z., Chen, Q., Wang, Y., & Shu, D. (2009). *Microstructures and mechanical properties of AZ91D alloys with Y addition*. 515, 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.03.030>
- Zhiyong, Y., Yuhua, Z., Weili, C., Jinshan, Z., & Yinghui, W. (2012). Effect of Cu addition on microstructure and properties of Mg-10Zn-5Al-0.1 Sb high zinc magnesium alloy. *Research & Development*, 41(February), 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.036>

# Aplikasi Filter Digital untuk Citra Mengandung Derau *Salt and Pepper* Menggunakan Metode *Directional Weighted Minimum Deviation*

Rifa Hanifatunnisa<sup>1</sup> dan Rahmawati Hasanah<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Teknik Telekomunikasi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia

<sup>1</sup>[rifahani@polban.ac.id](mailto:rifahani@polban.ac.id), <sup>2</sup>[rahmawati@polban.ac.id](mailto:rahmawati@polban.ac.id)

## Abstrak

Teknologi telekomunikasi berkembang begitu pesat, dari yang semula berkomunikasi menggunakan surat, berkembang komunikasi suara menggunakan telepon hingga kini telah sampai pada tahap komunikasi gambar dan video. Dalam proses pentransmisi data baik suara maupun gambar tidak terlepas dari adanya derau. Salah satu solusi dalam menjawab permasalahan tersebut adalah dengan mengembangkan teknologi Filter Digital. Dalam penelitian ini direalisasikan sebuah Filter digital dengan objek gambar menggunakan metode DWMD (*Directional Weighted Minimum Deviation*) Filter dengan mendeteksi jenis derau *salt and pepper*. Metode DWMD Filter adalah metode pengolahan data digital berbasis arah dan standar deviasi yang memperbaiki *Median Filter*. Dengan membandingkan parameter PSNR maka diketahui bahwa DWMD dapat menghasilkan gambar lebih baik dari *Median Filter*. Metode Filter DWMD ini ditambah dengan penentuan *Threshold* otomatis untuk membantu proses filter menjadi lebih cepat dimana diambil selisih PSNR terbesar. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pada level derau 5% - 65% metode DWMD menghasilkan PSNR bernilai 21-36 dB dibandingkan dengan *Median Filter* sebesar 13-29 dB. Penelitian ini memiliki output berupa aplikasi desktop yang dilengkapi dengan fitur-fitur yang dapat menambahkan derau *salt and pepper* pada berbagai densitas dan mengakses citra yang dapat diubah ke dalam format *grayscale*.

Kata kunci: Filter Digital, DWMD, Citra, Derau *Salt and Pepper*

## Abstract

Telecommunications technology growing rapidly, from the initial communication using letters, and now has reached the stage of image and video communication. In the process of transmitting data, both sound and images cannot be separated from noise. One solution to answer these problems is develop Digital Filter technology. In this research, a digital filter realized with an image object using the DWMD Filter method by detecting the type of salt and pepper noise. The DWMD Filter is a direction and standard deviation based digital data processing that improves the Median filter. With the PSNR, it is known that DWMD can produce better images than the Median Filter. This DWMD Filter method is coupled with an automatic Threshold determination to help the filter process to be faster where the largest PSNR difference is taken. The experimental results show that at a noise level of 5% - 65% the DWMD method produces a PSNR of 21-36 dB compared to the Median Filter of 13-29 dB. This research has an output in the form a desktop application that is equipped with features that can add salt and pepper noise in various densities and access images that can be converted into grayscale format.

Keywords: Digital Filter, DWMD, Image, Salt and Pepper noise

## 1. Pendahuluan

Seiring perkembangan teknologi yang pesat saat ini, citra digital merupakan hal yang populer termasuk dalam pengiriman informasi. Selama proses transmisi, sering didapatkan gambar yang tercemar oleh derau yang menghasilkan citra dengan kualitas yang rendah (Fu, Zhao, Ren, Li, & Wang, 2019). Derau dapat menurunkan kualitas citra yang menyebabkan hilangnya informasi dan tampilan yang tidak memuaskan bahkan tidak jelas. Salah satu jenis derau yang paling populer dalam mempengaruhi kualitas citra yaitu derau *salt and pepper* (Al-Azzeh, Zahran, & Alqadi, 2018). Citra digital mungkin mengandung derau yang disebabkan oleh faktor lingkungan, atau disebabkan juga karena saluran transmisi data yang tidak baik saat proses pengiriman citra tersebut (Harmayani & Rahim, 2017). Karena itu, hanya sebagian dari semua piksel citra digital yang rusak sedangkan piksel lainnya tidak mengandung derau. Derau *salt and pepper* adalah salah satu derau yang sering mengganggu citra digital yang berupa piksel hitam dan putih yang dapat mengganggu tampilan citra digital. Padahal citra yang baik merupakan citra yang dapat menampilkan gambar secara utuh, seperti keindahan gambar dan kejelasan gambar tanpa mengurangi dan tanpa mengubah informasi yang terkandung pada sebuah gambar atau citra (Novian, 2019). Oleh karena itu, penting untuk mendeteksi piksel yang telah tercemar oleh derau, dan dapat memulihkan nilai yang efisien untuk masing-masing

### Info Makalah:

Dikirim : 08-18-21;

Revisi 1 : 10-19-21;

Diterima : 12-06-21.

### Penulis Korespondensi:

e-mail : [rifahani@polban.ac.id](mailto:rifahani@polban.ac.id)

*piksel*, yang dikenal sebagai *image filters*. Mereduksi derau merupakan suatu proses untuk membersihkan atau mereduksi gangguan pada citra sehingga informasi data dari citra tersebut tidak hilang serta dapat diinterpretasikan dengan mata manusia (Tasni, 2018). *Image de-noising filters* memiliki beragam kegunaan misalnya, penyelidikan citra medis, pemeriksaan sinyal (video, suara, suara), penghapusan informasi, ilmu ruang radio, dan lain-lain (Bharati, Khan, & Podder,

2020). Median Filter merupakan metode reduksi derau yang umum untuk jenis derau *salt and pepper* ini (Jassim, 2013). Tingkat ketahanan dari Median filter dengan kompleksitas komputasi yang rendah telah membuktikan bahwa metode Median filter cocok untuk pengurangan derau. Tetapi, kelemahan pada Median filter adalah bekerja dengan baik apabila mereduksi *impulse noise* yaitu *salt and pepper derau* dalam intensitas derau yang sangat kecil, tidak untuk intensitas yang cukup besar dan juga median *filter* ini memodifikasi nilai *piksel* yang bebas dari derau sehingga *piksel* dari gambar asli terhapus. Untuk memperbaiki Median *Filter*, maka digunakan metode *Directional Weighted Minimum Deviation* (DWMD) Filter yang bekerja berdasarkan perhitungan Standar Deviasi (Mondal & Mukhopadhyay, 2010) dan bekerja pada citra digital berskala keabuan. Dalam DWMD Filter ini terdapat dua tahapan utama yang harus dilakukan.

## 2. Metode

### Citra Berskala Keabuan

Dalam citra digital, skala keabuan berarti bahwa nilai setiap piksel hanya mewakili informasi intensitas cahaya. Gambar seperti itu biasanya hanya menampilkan hitam paling gelap hingga putih paling terang. Dengan kata lain, gambar hanya berisi warna hitam, putih, dan abu-abu, di mana abu-abu memiliki beberapa tingkatan. Dalam gambar skala abu-abu, nilai setiap piksel terkait dengan jumlah bit data yang digunakan untuk mewakili piksel tersebut. Nilai dari citra keabuan biasanya diwakili oleh 8 bit, yaitu kombinasi dari delapan bilangan biner mewakili nilai piksel dari suatu piksel. Oleh karena itu, rentang nilai piksel adalah 0–255 (0b00000000-0b11111111, “0b” berarti angka berikut dalam format biner), dengan total 256 level skala abu-abu. Jika angka 16-bit digunakan untuk mewakili nilai piksel suatu piksel, rentang nilainya adalah 0–65.535, dengan total 65.536 level skala abu-abu (Liu, 2020).

Citra *grayscale* merupakan hasil rata-rata dari citra RGB (Kurniawan, Sentinuwo, & Lantang, 2016). Maka dari itu, untuk membuat gambar berskala keabuan maka kita harus menyamakan intensitas dari tiga komponen warna dasar yaitu RGB dengan mencari nilai rata-ratanya.

### Derau *Salt and Pepper*

Derau *salt and pepper* juga dinamakan sebagai derau impuls positif dan negatif, derau tembakan, atau derau biner, derau ini biasanya disebabkan oleh gangguan yang tiba-tiba dan tajam pada proses perolehan isyarat citra, bentuk derau ini berupa bintik-bintik hitam atau putih di dalam citra digital (Gunadi, Wicaksana, Dwija, Putra, & Putra, 2020). Nilai piksel derau *salt and pepper* standar dapat berupa minimum (0) atau maksimum (255), dimana nilai intensitas tipikal untuk *pepper* derau mendekati 0 dan untuk *salt derau* mendekati 255, piksel yang tidak terpengaruh tetap tidak berubah (Al-Azzeh, Zahran, & Alqadi, 2018).

### Median Filter

Terdapat beberapa metode yang diusulkan untuk merekonstruksi citra yang rusak oleh derau *salt and pepper*. Penelitian untuk non linear filter dilakukan secara aktif untuk mereduksi derau *salt and pepper*, didapatkan median filter yang merupakan jenis filter non linear yang paling populer digunakan (Liang, Li, & Zhao, 2021). Median Filter ini digunakan untuk menghilangkan derau yang tidak diinginkan dari citra digita; sekaligus melindungi orisinalitas gambar (Duth & Deepa, 2018).

### PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*)

*Peak Signal to Noise Ratio* (PSNR) didefinisikan sebagai perbandingan antara nilai maksimum dari sinyal yang diukur dengan besarnya derau yang berpengaruh pada sinyal tersebut (Pinki & Mehra, 2016). PSNR biasanya diukur dalam satuan decibel (db). PSNR digunakan untuk mengetahui perbandingan kualitas citra sebelum dan sesudah difilter. Untuk menentukan PSNR, terlebih dahulu harus ditentukan nilai MSE (*Mean Square Error*). MSE adalah nilai *error* kuadrat rata-rata antara citra asli dengan citra manipulasi (dalam kasus filter ; MSE adalah nilai *error* kuadrat rata-rata antara citra asli (*cover-image*) dengan citra hasil filter (*filter-image*).

Dalam suatu pengembangan dan pelaksanaan rekonstruksi gambar diperlukan perbandingan antara gambar hasil rekonstruksi dengan gambar asli. Ukuran umum yang digunakan untuk tujuan ini adalah *Peak Signal to Noise Ratio* (PSNR). Nilai PSNR yang lebih tinggi menyiratkan kemiripan yang lebih erat antara hasil rekonstruksi dan gambar asli.

### DWMD (*Directional Weighted Minimum Deviation*) Filter

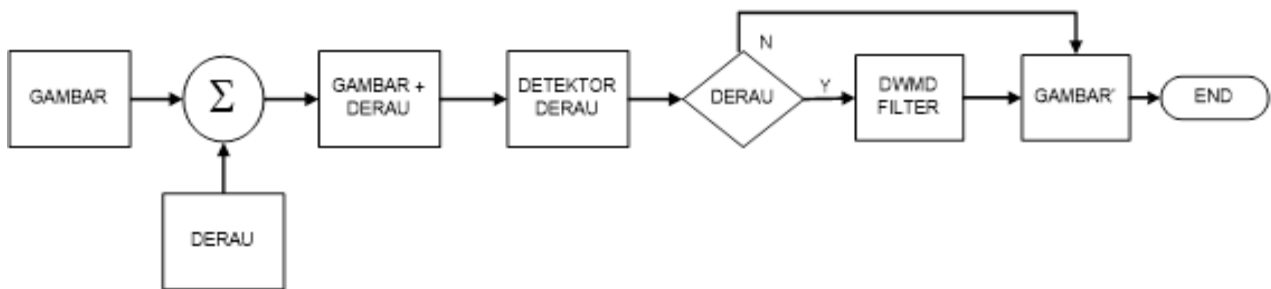
Gambar yang rusak karena *impulse derau* sering menjadi masalah utama selama poses transmisi gambar. Terdapat dua metode umum yang digunakan untuk meredam *derau* yaitu metode linear dan non linear. Metode filter non linear biasanya sering digunakan untuk meredam derau karena karakteristik dan hasil dari metode tersebut lebih baik dari pada metode linear (Chan, Ho, & Nikolova, 2005). Salah satu filter linear yang sering digunakan adalah Median Filter. Tingkat ketahanan dari Median filter dengan kompleksitas komputasi yang rendah telah membuktikan bahwa metode Median filter cocok untuk pengurangan derau. Tetapi, Median *filter* bekerja dengan baik untuk *impulse* derau yaitu

*salt and pepper derau* hanya dalam intensitas derau yang sangat kecil tidak untuk intensitas yang cukup besar dan juga median filter ini memodifikasi nilai *piksel* yang bebas dari derau sehingga *piksel* dari gambar asli terhapus. Untuk memperbaiki Median Filter, maka digunakanlah metode *Directional Weighted Minimum Deviation* (DWMD) Filter yang bekerja berdasarkan perhitungan Standar Deviasi (Mondal & Mukhopadhyay, 2010). Dalam DWMD Filter ini terdapat dua tahapan utama yang harus dilakukan. Tahap pertama adalah mendeteksi *piksel* yang telah terkontaminasi derau dengan mencari selisih antara *piksel* yang sedang diproses dengan *piksel* sekelilingnya menggunakan empat arah utama. Tahapan filter yang kedua adalah menggantikan nilai *piksel* yang telah terdeteksi derau diawali dengan perhitungan Standar Deviasi dari empat arah utama lalu dicarilah nilai rata-rata dari satu arah yang bernilai minimum. Data Threshold yang diambil dalam aplikasi ini merupakan nilai threshold optimum yang dibuat otomatis dengan membandingkan selisih dari PSNR(2)-PSNR(1) yang terbesar, dimana PSNR (1) sebagai nilai perbandingan antara gambar asli dengan gambar yang terkontaminasi derau dan PSNR (2) sebagai nilai perbandingan antara gambar asli dengan gambar hasil filter yang merupakan tambahan dalam metodi ini agar aplikasi dapat menampilkan filter optimal secara otomatis.

Proses Filter ini berawal dengan pengambilan sampel gambar digital dari file gambar yang telah tersimpan pada *device*. Sampel gambar yang diambil diubah menjadi gambar berskala keabuan lalu di-generate dengan *Salt and Pepper Noise* yang dapat diatur kerapatan *noise*-nya. Setelah itu dilakukan proses pendeteksian derau pada gambar yang telah di-generate *noise*-nya dengan menggunakan metode *DWMD Impulse Detector*. Jika terdeteksi *Noise* maka gambar digital difilter dengan *Directional Weighted Minimum Deviation Filter* yang ditentukan nilai threshold filternya terlebih dahulu.

Hasil pemfilteran akan disajikan dalam gambar yang ditampilkan beserta nilai *Peak Signal to Noise Ratio* (PSNR) dari *piksel* gambar berskala keabuan dengan *piksel* gambar yang telah difilter.

Tahapan penyelesaian perancangan peredam *impulse noise* pada sampel gambar digital berskala keabuan dengan metode *Directional Weighted Minimum Deviation Filter* ditempuh dalam beberapa tahap seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok Diagram Peredaman *Salt and Pepper Noise*

### Detektor Derau

Pada metode DWMD Filter ini dimulai dengan menetapkan 4 buah arah vektor yang berpusat pada titik  $P(x,y)$ . Terdapat berbagai alamat *piksel* dari masing – masing arah seperti yang terlihat dalam Gambar 2.

T <sub>15</sub>	T <sub>14</sub>	T <sub>13</sub>	T <sub>12</sub>	T <sub>11</sub>
T <sub>16</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>10</sub>
T <sub>17</sub>	T <sub>5</sub>	P	T <sub>1</sub>	T <sub>9</sub>
T <sub>18</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>24</sub>
T <sub>19</sub>	T <sub>20</sub>	T <sub>21</sub>	T <sub>22</sub>	T <sub>23</sub>

Gambar 2. Pengalamatan 4 arah pada *window* 5 x 5

$$S_1 = ( T_{15} , T_4 , P , T_8 , T_{23} ) \\ = ((i-2,j-2) , (i-1,j-1) , (i,j) , (i+1,j+1) , (i+2,j+2)) \quad (1)$$

$$S_2 = ( T_{17} , T_5 , P , T_1 , T_9 ) \\ = ((i,j-2) , (i,j-1) , (i,j) , (i,j+1) , (i,j+2)) \quad (2)$$

$$S_3 = ( T_{11} , T_2 , P , T_6 , T_{19} ) \\ = ((i-2,j+2),(i-1,j+1),(i,j),(i+1,j-1),(i+2,j-2)) \quad (3)$$

$$S_4 = (T_{13}, T_3, P, T_7, T_{21}) \\ = ((i,j-2), (i,j-1), (i,j), (i,j+1), (i,j+2)) \quad (4)$$

Dalam window  $5 \times 5$  berpusat di  $(i, j)$ , untuk setiap arah mendefinisikan  $d_{i,j}^{(k)}$  sebagai jumlah dari perbedaan absolut nilai *gray level* antara  $y_{i+s,j+t}$  dan  $y_{i,j}$  dengan  $(s, t) \in S_k^0$  ( $k = 1$  sampai  $4$ ). Dengan mempertimbangkan jarak *pixel* yang sangat dekat dengan nilai spasial yang kecil, berarti nilai *gray level* harus dekat. Nilai *pixel* yang paling dekat dengan titik pusat akan dikalikan agar nilainya lebih besar daripada nilai *pixel* yang lainnya dengan cara mengalikannya dengan  $\omega_m$  sebelum semuanya dijumlahkan. Tetapi, jika  $\omega_m$  bernilai sangat besar, itu akan menjadi penyebab utama perbedaan  $d_{i,j}^{(k)}$  sesuai dengan besarnya nilai  $\omega_m$ .

Dimisalkan  $\omega_m = 2$ , maka didapatkan :

$$d_{i,j}^{(k)} = \sum_{(s,t) \in S_k^0} \omega_{s,t} |y_{i+s,j+t} - y_{i,j}|, 1 \leq k \leq 4 \quad (5)$$

$$\text{dimana } \omega_m = \begin{cases} 2 : (s,t) \in \Omega^3 \\ 1 : \text{yang lainnya} \end{cases} \quad (6)$$

$$\Omega^3 = \{(s,t) : -1 \leq s, t \leq 1\} \quad (7)$$

$d_{i,j}^{(k)}$  disebut sebagai indeks arah. Kemudian empat indeks arah digunakan untuk deteksi derau, yang dapat dilambangkan sebagai

$$r_{i,j} = \min\{d_{i,j}^{(k)} : 1 \leq k \leq 4\} \quad (8)$$

Kemudian mendefinisikan detektor *derau* sebagai Threshold (T) otomatis.

$$y_{i,j} \text{ adalah } \begin{cases} \text{noise pixel} : \text{jika } r_{i,j} > T \\ \text{free noise pixel} : \text{jika } r_{i,j} \leq T \end{cases} \quad (9)$$

### Filterisasi

Setelah deteksi derau, kebanyakan median filter cukup melakukan penggantian *pixel* yang terdeteksi derau dengan nilai mediannya saja. Dalam *Directional Weighted Minimum Deviation* (DWMD) Filter ini telah dikemukakan dengan berdasarkan minimum standar deviasi dari empat arah. Pada awalnya, nilai standar deviasi  $\delta_{i,j}^{(k)}$  dari nilai *gray level* dari semua  $y_{i+s,j+t}$  dengan  $(s,t) \in S_k^0$  ( $k = 1$  s.d.  $4$ ), dihitung.

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum (X - \mu)^2}{N}} \quad (10)$$

Lalu mencari nilai minimum dari keempat arah tersebut.

$$l_{i,j} = \min k \{ \delta_{i,j}^{(k)} : 1 \leq k \leq 4 \} \quad (11)$$

Setelah  $l_{i,j}$  diketahui, maka dilanjutkan mengambil nilai *pixel* dari arah tersebut misal  $S = \{a, b, c, d, e\}$ . Pertama, nilai tengah diganti dengan *pixel*  $x$  untuk menghasilkan  $S = \{a, b, x, d, e\}$ . Dilanjutkan dengan menghitung tiga standar deviasi menggunakan  $x = \{\text{mean}, \text{mean} + 5, \text{mean} - 5\}$  carilah nilai paling rendah di antara ketiga standar deviasi tersebut lalu ambil nilai  $x$  untuk mengganti nilai tengah yang teridentifikasi sebagai derau.

### Penentuan Nilai Threshold Optimum

Dalam suatu pengembangan dan pelaksanaan rekonstruksi gambar diperlukan perbandingan antara gambar hasil filter dengan gambar asli. Perbandingan ini digunakan untuk mengetahui seberapa dekatnya hasil gambar filterisasi dengan gambar aslinya atau tanpa mengandung derau. Ukuran umum yang digunakan untuk tujuan ini adalah *Peak Signal to Derau Ratio* (PSNR). Nilai PSNR yang lebih tinggi menyiratkan kemiripan yang lebih erat antara hasil filterisasi dengan gambar asli. PSNR didefinisikan sebagai :

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{C_{max}^2}{MSE} \right) \quad (12)$$

Filter digital ini menggunakan nilai *threshold* optimum yang didapatkan secara otomatis berbasis nilai PSNR, yaitu dengan membandingkan selisih dari PSNR(2)-PSNR(1) yang terbesar, dimana PSNR (1) sebagai nilai perbandingan antara gambar asli dengan gambar yang terkontaminasi derau dan PSNR (2) sebagai nilai perbandingan antara gambar asli dengan gambar hasil filter yang merupakan tambahan dalam metode ini agar aplikasi dapat menampilkan filter optimal secara otomatis.

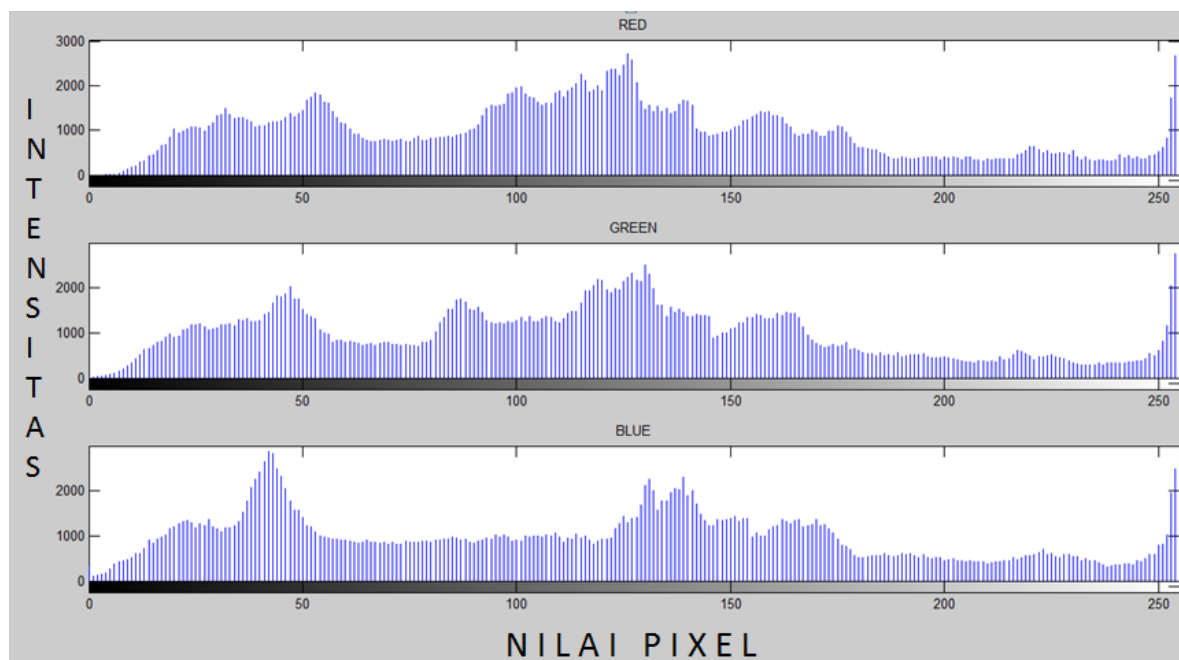


### 3. Hasil dan Pembahasan

Pada proses pengambilan citra digital orisinal, gambar yang akan diproses belum tentu gambar berskala keabuan. Dikarenakan dalam proses filterisasi ini harus menggunakan gambar berskala keabuan maka gambar orisinal yang masih berskala RGB seperti gambar 3. harus diubah menjadi gambar berskala keabuan. Gambar orisinal diambil nilai pikselnya lalu dilanjutkan dengan proses mengubah gambar menjadi gambar berskala keabuan. Nilai Piksel dapat diukur menggunakan program Histogram dalam perangkat lunak Matlab dengan hasil seperti pada Gambar 4.

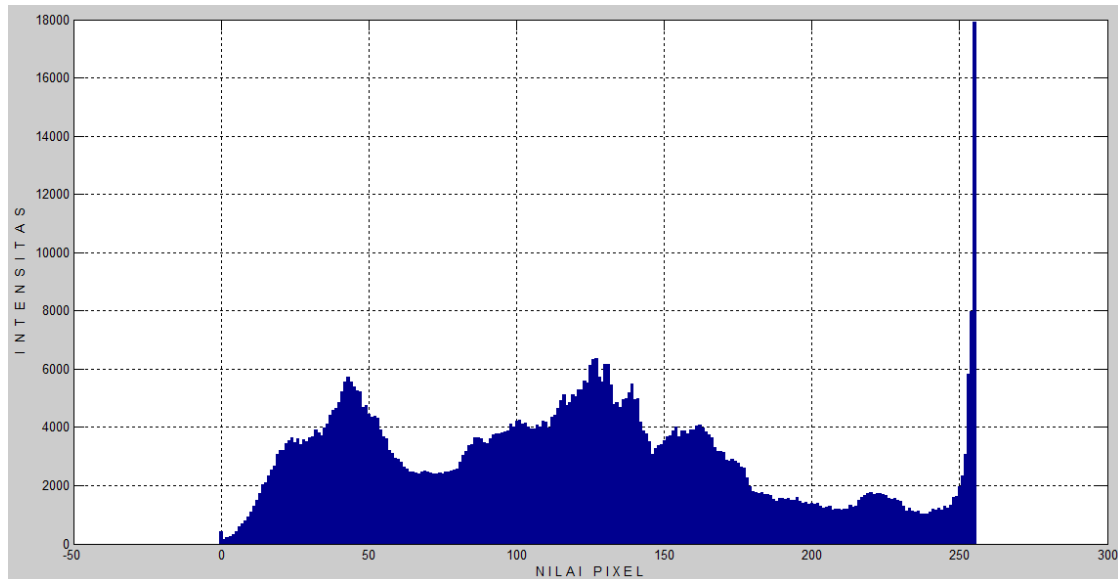


Gambar 3. (a) Gambar Orisinal (b) Gambar Berskala Keabuan



Gambar 4. Histogram Gambar Orisinal (RGB)

Dapat dilihat bahwa diagram pada Gambar 4 yang menggambarkan frekuensi setiap nilai intensitas yang muncul di seluruh *piksel* gambar orisinal intensitas warna dalam nilai *piksel* yang bernilai 255 (warna putih) berjumlah 18000 lebih *piksel* RGB sedangkan pada diagram Gambar 5 nilai *piksel* yang bernilai 255 tidak lebih dari 14000 *piksel*.



Gambar 5. Histogram Gambar Berskala Keabuan

Dengan menggunakan diagram histogram yang telah diukur, maka dapat diketahui jumlah pasti dalam setiap *pixel*. Dalam pengujian ini, diperlukan jumlah *pixel* hitam dan putih untuk mengetahui intensitas derau yang di-generate dalam program nantinya seperti tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Jumlah *Pixel* Hitam dan Putih dalam Gambar Sample

Pixel	Intensitas Pixel
0	12
255	$1,304 \times 10^4$

#### Pengujian dan Analisis Gambar dengan Probabilitas Derau yang tetap dan Ukuran Gambar yang Berbeda.

Pada pengujian ini dilakukan penambahan *salt and pepper* derau dengan probabilitas dan gambar yang sama dalam berbagai variasi ukuran (*pixel*). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai *Threshold* dan PSNR yang optimum dengan hasil seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengujian Nilai *Threshold* dan PSNR Optimum

No.	Ukuran Gambar ( <i>pixel</i> )	<i>Threshold</i>	PSNR(dB)
1	$2000 \times 2000$	400	30,94
2	$1800 \times 1800$	450	29,53
3	$1600 \times 1600$	500	27,94
4	$1400 \times 1400$	550	26,39
5	$1200 \times 1200$	600	25,06
6	$1000 \times 1000$	650	23,86
7	$800 \times 800$	700	22,79
8	$600 \times 600$	750	22,05
9	$400 \times 400$	750	21,76
10	$200 \times 200$	650	23,35
11	$100 \times 100$	600	24,59
12	$50 \times 50$	500	27,73

Dari Tabel 2 dapat diketahui bahwa ukuran gambar mempengaruhi nilai optimum *Threshold* dan PSNR. Nilai PSNR berbanding terbalik dengan nilai *threshold*. Semakin besar nilai *threshold* maka nilai PSNR semakin menurun.

#### Analisis Hasil Pengujian Derau *Pixel*

Pada proses pengurangan derau *salt and pepper* menggunakan metode *Directional Weighted Minimum Deviation* (DWMD) Filter ini didapatkan data seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Jumlah Derau yang diproses

No	Probabilitas	Derau yang Bersisa	Derau yang Tereduksi
1	0,05	3024	10101
2	0,1	5355	20913
3	0,15	7953	31269
4	0,2	11208	41086
5	0,25	11595	53634
6	0,3	14283	64296
7	0,35	17100	80660
8	0,4	20256	84780
9	0,45	23923	94083
10	0,5	20568	109773
11	0,55	23142	121230
12	0,6	27899	128816
13	0,65	29490	140764













Semakin tinggi nilai probabilitas, maka semakin tinggi pula jumlah derau yang harus diredam. Dari data pada tabel 3 didapatkan jumlah derau yang tertinggal pada gambar digital yang telah di proses dengan metode DWMD Filter. Derau yang tereduksi mengalami peningkatan di setiap kenaikan nilai probabilitas, akan tetapi derau yang tertinggal pun semakin banyak di setiap kenaikan nilai probabilitasnya. Maka, semakin besar nilai probabilitas akan semakin buruk pula hasil filterisasinya.












Dalam pengujian ini hanya memasukkan nilai probabilitas sampai 0,65 karena dalam percobaan, gambar yang dihasilkan sudah rusak dan dalam perbandingan jumlah *piksel* derau sudah lebih banyak dibandingkan dengan jumlah *piksel* gambar asli, maka proses filterisasi pun akan sulit memroses gambar agar hasilnya menjadi seperti sedia kala tanpa derau.

#### Analisis Perbandingan DWMD dengan Median Filter

Dalam pengujian mencari nilai PSNR kali ini, dilakukan dengan membandingkan DWMD Filter dengan Median Filter. Pengujian Median Filter menggunakan sampel gambar yang sama dan probabilitas yang sama. Dari hasil pemfilteran gambar digital yang telah diberi salt and pepper derau menggunakan DWMD Filter dan Median Filter sebagai pembanding, maka didapatkan data seperti pada Tabel 4.

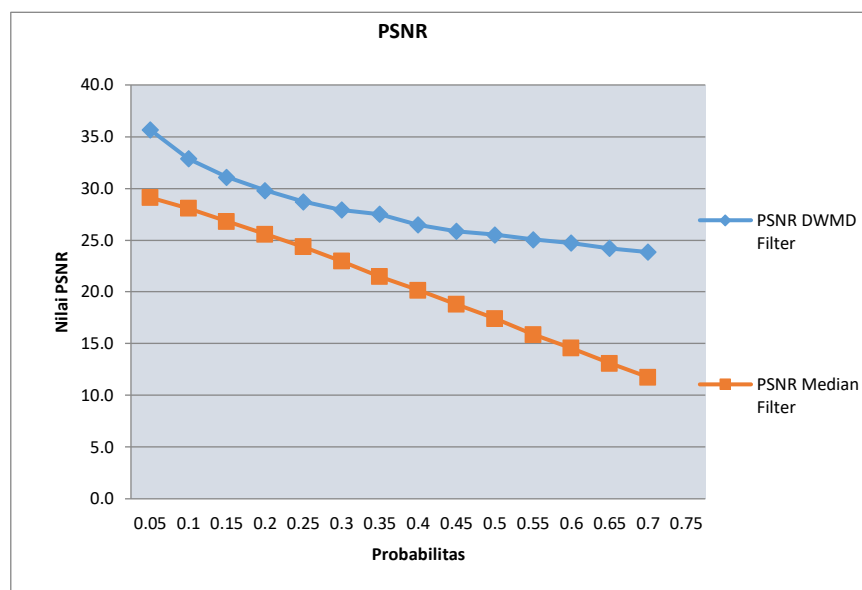
Tabel 4. Perbandingan DWMD dengan Median Filter

Probabilitas	DWMD Filter	Median Filter	Probabilitas	DWMD Filter	Median Filter
0,05	 PSNR:35.67659 dB	 PSNR : 29.1190 dB	0,2	 PSNR : 29,82 dB	 PSNR : 25,59 dB
0,1	 PSNR : 32.86809 dB	 PSNR : 28.0924 dB	0,25	 PSNR : 28,72 dB	 PSNR : 24,37 dB
0,15	 PSNR : 31,08 dB	 PSNR : 26,82 dB	0,3	 PSNR : 27,92 dB	 PSNR : 22,97 dB

Probabilitas	DWMD Filter	Median Filter	Probabilitas	DWMD Filter	Median Filter
0,35	 PSNR : 27,51 dB	 PSNR : 21,47 dB	0,55	 PSNR : 25,08 dB	 PSNR : 15,88 dB
0,4	 PSNR : 26,49 dB	 PSNR : 20,16 dB	0,6	 PSNR : 24,74 dB	 PSNR : 14,57 dB
0,45	 PSNR : 25,85 dB	 PSNR : 18,79 dB	0,65	 PSNR : 24,22 dB	 PSNR : 13,11 dB
0,5	 PSNR : 25,53 dB	 PSNR : 17,44 dB			

Data tersebut menunjukkan bahwa probabilitas derau mempengaruhi besarnya nilai *Peak Signal to Derau Ratio* (PSNR) untuk gambar yang telah diproses dengan gambar asli. Semakin besar nilai probabilitas, maka semakin kecil nilai PSNR pada tiap hasil filterisasi. Pada PSNR yang dihasilkan oleh DWMD Filter terlihat perbedaan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan PSNR yang dihasilkan oleh Median Filter. Maka, dengan data tersebut dapat terlihat bahwa DWMD Filter dapat mengurangi derau lebih baik dari pada Median Filter.

Perbandingan nilai PSNR pada DWMD Filter dengan Median Filter dapat ditunjukkan oleh grafik seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Perbandingan Nilai PSNR

Dari grafik pada gambar 4 menunjukkan bahwa nilai PSNR untuk DWMD Filter maupun Median Filter nilainya menurun dalam setiap kenaikan nilai probabilitasnya hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi intensitas derau pada suatu gambar maka semakin buruk pula kualitas gambar yang dihasilkan oleh proses filterisasi tersebut.

Tabel 5. Perbandingan Waktu Eksekusi pada DWMD dan Median Filter

No.	Ukuran Gambar (piksel)	Waktu yang Digunakan	
		DWMD Filter	Median Filter
1	2000 × 2000	97,96 s	77,35 s
2	1800 × 1800	81,78 s	60,24 s
3	1600 × 1600	63,47 s	46,71 s
4	1400 × 1400	48,47 s	36,17 s
5	1200 × 1200	37,69 s	26,36 s
6	1000 × 1000	27,19 s	18,69 s
7	800 × 800	18,09 s	12,43 s
8	600 × 600	11,35 s	6,93 s
9	400 × 400	6,39 s	3,12 s
10	200 × 200	3,25 s	1,08 s
11	100 × 100	2,97 s	0,44 s
12	50 × 50	2,08 s	0,34 s

DWMD Filter dan Median Filter ini memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing. Pada tabel 5 terlihat bahwa kekurangan dari DWMD Filter ini terdapat pada waktu pengerjaannya. Semakin besar ukuran gambar yang diproses, maka semakin lama pula waktu yang diperlukan untuk memfilter suatu gambar. Pada DWMD Filter, waktu eksekusi bergantung pula pada besarnya nilai *threshold* yang digunakan. Dimana Nilai PSNR yang lebih tinggi menyiratkan kemiripan yang lebih erat antara hasil rekonstruksi dan gambar asli dalam penelitian ini

### Kesimpulan

Berdasarkan perancangan dan hasil pengujian maka dapat disimpulkan bahwa filter digital untuk objek gambar dengan metode *Directional Weighted Minimum Deviation* ini meredam *Salt and Pepper derau* lebih baik dibandingkan dengan Median Filter pada umumnya. Dengan kualitas nilai *Peak Signal to Derau Ratio* (PSNR) yang lebih besar dibandingkan dengan Median Filter untuk setiap nilai *threshold*. Dalam pengujian metode DWMD filter ini, didapatkan persentase rata-rata mampu meredam *salt and pepper derau* sekitar 80% dari jumlah derau yang muncul dalam setiap perubahan nilai probabilitasnya (0 s.d. 0,65). Semakin besar ukuran dan intensitas *derau* pada gambar maka semakin lambat pula proses filterisasi pada DWMD filter dibandingkan dengan Median filter. Nilai PSNR yang didapatkan pada pengujian DWMD Filter berkisar antara 21 – 36 dB. Gambar yang sudah di filter dengan metode ini terlihat lebih baik dari gambar asli saat terkontaminasi oleh derau.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada P3M Polban yang telah mendukung penelitian yang dilakukan ini, sehingga penelitian dapat berjalan dengan baik.

### Daftar Notasi

$P = (i, j)$  = Titik Pusat

$i$  = baris

$j$  = kolom;

$S$  = Standar Deviasi

$n$  = jumlah sampel ( jumlah *piksel* dalam satu arah )

$X$  = nilai dari setiap *piksel*

### Daftar Pustaka

- Al-Azzeh, J., Zahran, B., & Alqadi, Z. (2018). Salt and Pepper Noise: Effects and Removal. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*.
- Bharati, S., Khan, T. Z., & Podder, P. (2020). A comparative analysis of image denoising problem: noise models, denoising filters and applications. *preprints.org*.
- Chan, R. H., Ho, C.-W., & Nikolova, M. (2005). Salt-and-pepper noise removal by median-type noise detectors and detail-preserving regularization. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1479-1485.
- Duth, P. S., & Deepa, M. M. (2018). Color detection in RGB-modeled images using MAT LAB. *International Journal of Engineering & Technology*, 29-33.

- Fu, B., Zhao, X.-Y., Ren, Y.-G., Li, X.-M., & Wang, X.-H. (2019). A salt and pepper noise image denoising method based on the generative classification. *Multimedia Tools and Applications*, 12043–12053. doi:<https://doi.org/10.1007/s11042-018-6732-8>
- Gunadi, I. G., Wicaksana, I. G., Dwija, M. R., Putra, I. P., & Putra, P. P. (2020). Pengurangan Noise Pada Citra Digital Menggunakan Filter Aritmatik Mean, Harmonik Mean, Gaussian, Max, Min, Dan Median Dengan Membandingkan PSNR. *Jurnal Ilmu Komputer Indonesia(JIK)*, 35-44.
- Harmayani, & Rahim, R. (2017). 24 Bit Image Noise Reduction with Median Filtering Algorithm. *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER)*, 1-5.
- Jassim, F. A. (2013). Kriging Interpolation Filter to Reduce High Density Salt and Pepper Noise. *World of Computer Science and Information Technology Journal (WCSIT)* , 8-14.
- Kurniawan, B. S., Sentinuwo, S. R., & Lantang, O. A. (2016). Aplikasi Pengenal Citra Nomor Kendaraan Bermotor Menggunakan Metode Template Matching. *E-journal Teknik Informatika*, 7-12.
- Liang, H., Li, N., & Zhao, S. (2021). Salt and Pepper Noise Removal Method Based on a Detail-Aware Filter. *The 3rd International Conference on Symmetry*. sciforum.
- Liu, H. (2020). Grayscale and gray image. In *Robot Systems for Rail Transit Applications* (pp. 123-124). Matthew Deans.
- Mondal, P. J., & Mukhopadhyay, S. (2010). A Novel Directional Weighted Minimum Deviation (DWMD) Based Filter for Removal of Random Valued Impulse Noise. *Proceedings of ICCS* (pp. 214-220). Burdwan, West Bengal: Department of Computer Science, The University of Burdwan.
- Novian, A. (2019). 42Perancangan Aplikasi Denoise Citra Dengan Menerapkan New Daptive Based Median Filter. *Building of Informatics, Technology and Science (BITS)*, 42-47.
- Pinki, & Mehra, R. (2016). Estimation of the Image Quality under Different Distortions. *International Journal Of Engineering And Computer Science*, 17291-17296.
- Tasni, K. (2018). Penerapan Algoritma Band Reject Filter untuk Mereduksi Noise pada Citra Digital. *Jurnal Pelita Informatika*, 341-346.